COLLECTION «LA TECHNIQUE DU METIER»
publiée sous la direction de A. CAMPA, Inspecteur Général de l'E.T.

CH. LOBJOIS

technologie professionnelle pour le chaudronnier

TOME 2

Foucher . Paris

Couverture : Machine à souder à molettes MR 200.
(Cliché SCIAKY, Vitry-sur-Seine.)

CH. LOBJOIS

Professeur technique
École Normale Nationale d'Enseignement Technologique de Nantes

TECHNOLOGIE PROFESSIONNELLE POUR LE CHAUDRONNIER

TOME II

LES ÉDITIONS FOUCHER
128, RUE DE RIVOLI - PARIS 1er

Du même auteur

Technologie professionnelle

pour le

CHAUDRONNIER

TOME I

Préparation du travail et mise en forme des pièces développables

❖

Tracés de CHAUDRONNERIE

TOME I

Projections et vraies grandeurs des droites et des surfaces planes. Développement des solides géométriques élémentaires, des coudes cylindriques et coniques

* * *

TOME II

Surfaces composées. Surfaces développables quelconques - Intersections - La sphère - Les hélicoïdes

❖

GÉOMÉTRIE ET CONSTRUCTIONS GÉOMÉTRIQUES
pour le chaudronnier

2 TOMES

chez le même éditeur

Toute représentation, traduction, adaptation ou reproduction, même partielle, par tous procédés, en tous pays, faite sans autorisation préalable, est illicite et exposerait le contrevenant à des poursuites judiciaires. (Réf. Loi du 11 mars 1957.)
© LES ÉDITIONS FOUCHER, Paris, 1971.

CHAPITRE I

LES ASSEMBLAGES

Généralités

Après la mise en forme d'une pièce par cintrage, pliage ou martelage, on est ordinairement conduit à en réunir les extrémités: on procède à l'*assemblage*, couramment nommé, dans ce cas, ***joint***.

On peut aussi avoir à *assembler* plusieurs éléments entre eux: c'est ainsi que sont le plus souvent réalisés les ouvrages de tôlerie ou de chaudronnerie (fig. 1).

LES ASSEMBLAGES

peuvent être: *démontables*, *articulés*, *provisoires* ou *permanents*.

a) Ils sont dits **démontables** lorsque les pièces sont assemblées soit simplement par *emboîtage*, soit à l'aide d'organes dont au moins une partie est facilement démontable.

Ces assemblages sont réalisés par des procédés *uniquement mécaniques* utilisant:

— des ***boulons***, notamment pour l'assemblage sur place de différents éléments d'un ouvrage (fig. 1);

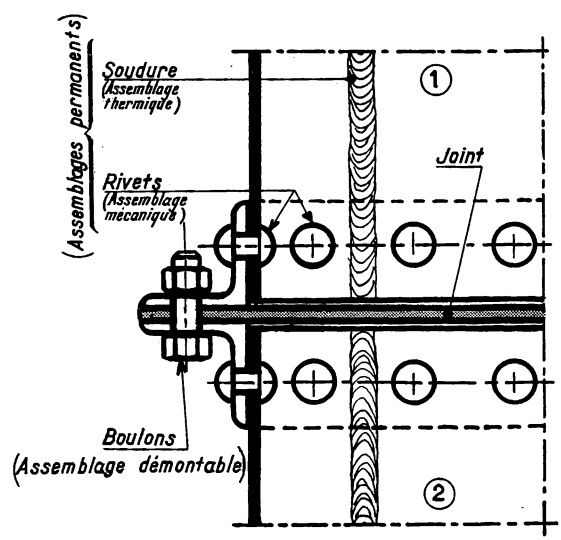


Fig. 1

Les pièces 1 et 2 sont assemblées entre elles au moyen de boulons serrés sur les cornières d'assemblage rivées sur chaque pièce. Le joint (caoutchouc, cuir, etc.) assure l'étanchéité de l'assemblage 1 et 2.

— des ***vis*** (fig. 2), pour la fixation de petites pièces (regards, plaques de fabrique, poignées, etc.) ;

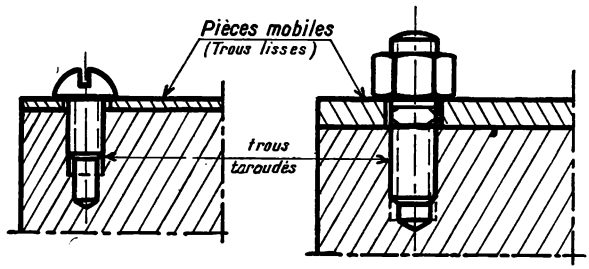


Fig. 2 Fig. 3

— des ***goujons*** (fig. 3) lorsque, l'une des faces étant inaccessible, l'introduction d'un boulon est impossible (portes de visite, trous d'homme, regards, doubles parois, etc.) ;

— des ***raccords*** divers employés en tuyauterie.

b) Les assemblages **articulés** laissent une certaine liberté de mouvement aux éléments assemblés, généralement par rotation de l'un d'eux ; l'assemblage est alors assuré par une charnière réalisée par les pièces elles-mêmes (fig. 4), ou rapportée (fig. 5).

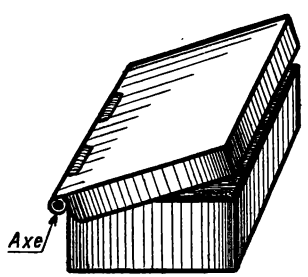


Fig. 4

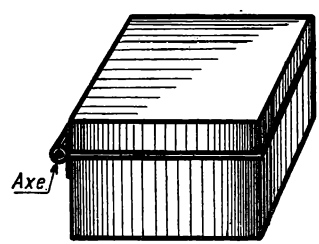


Fig. 5

c) Les assemblages **provisoires** immobilisent les parties d'un joint dans une position favorable à la préparation et à l'exécution de l'assemblage définitif.

On emploie à cet effet des boulons ou, plus rarement, des points de soudure.

d) Les assemblages sont dits **permanents** lorsque les parties assemblées le sont de façon inamovible ; ce sont les plus courants.

Les assemblages permanents sont réalisés par des procédés mécaniques ou thermiques.

PROCÉDÉS MÉCANIQUES

a) **L'agrafage** consiste à recourber en forme de crochets (agrafes) et à emboîter l'une dans l'autre les extrémités des pièces à assembler (fig. 6-7).

L'agrafage s'emploie sur tous les métaux et alliages en feuilles minces (*e* max.: 1,2 *mm*), sauf sur le zinc et le duralumin, trop cassants.

REMARQUE. — L'assemblage dit à *joint coulissant* (voir chapitre IV), réalisé par ce procédé, est démontable.

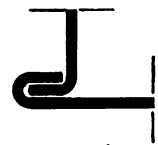


Fig. 6
Agrafe simple de fond.

Fig. 7
Agrafe repliée

b) Le **rivetage** est réalisé au moyen de ***rivets*** qui traversent les parties à réunir et les maintiennent l'une contre l'autre entre leurs deux têtes (fig. 1).

Les rivets se font en acier doux, acier inoxydable, cuivre, laiton, aluminium et ses alliages.

Le rivetage peut s'employer sur tous les métaux, de toutes épaisseurs.

c) Le **mandrinage** est employé pour fixer les tubes dans les plaques tubulaires ou les corps cylindriques des chaudières, les brides, etc.

Le ***mandrin*** ou ***dudgeon*** exerce, au moyen de galets, une pression à l'intérieur du tube qui se dilate et s'applique avec force contre la plaque, la bride, etc.

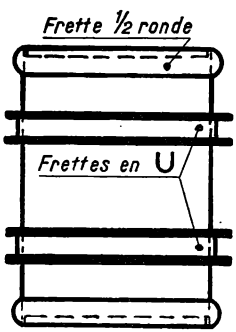


Fig. 8
Les frettes en fer demi-rond protègent les fonds. Le tonneau roule sur les frettes en fer U.

PROCÉDÉS THERMIQUES

a) **Le frettage** est basé sur les effets de la dilatation et du retrait.

Il est couramment utilisé en chaudronnerie pour raidir ou pour protéger des récipients (fig. 8): la ***frette,*** de dimensions inférieures à celles de la pièce, est mise en place après chauffage; au refroidissement, le retrait assure un serrage énergique.

On peut aussi fixer une pièce à l'intérieur d'une autre en usinant la première à des cotes légèrement trop grandes; avant la mise en place, elle est contractée par refroidissement en la plongeant dans l'azote liquide (température : — 195,8 °C).

b) **Le soudage** consiste à porter le métal à une température le rendant suffisamment plastique pour que les grains des parties en contact puissent adhérer intimement les uns aux autres.

Lorsque le métal (la pièce elle-même ou un métal d'apport) est amené à l'état de fusion, les grains ont une grande mobilité et le contact se fait sans le secours d'une pression.

Le métal ainsi fondu constitue, après solidification, le joint, la ***soudure.***

Au contraire, si la température de chauffage est inférieure à la température de fusion, la soudure est réalisée par *pression*, soit continue (presses), soit interrompue (chocs, martelage) : c'est le ***forgeage.***

Les soudures sont dites:

— ***hétérogènes*** lorsque le métal ou, plus généralement l'alliage utilisé pour la soudure, est différent de celui des pièces à assembler.

Généralement seul le métal d'apport est fondu; il est ainsi possible dans certains cas de souder ensemble deux métaux ou alliages différents.

— ***autogènes*** lorsqu'elles sont exécutées soit sans aucune addition de métal, soit avec un métal d'apport de même composition que celui des pièces à assembler.

REMARQUE. — Le terme *« **soudage** »* n'est pas exclusivement réservé pour désigner un assemblage réalisé par un procédé thermique (*exemples:* soudage aux ultrasons, soudage par pression à froid).

Le vocabulaire électrotechnique international définit ainsi le soudage:

Soudage: Opération consistant à réunir deux ou plusieurs parties d'un assemblage en assurant la continuité entre les parties à assembler (continuité de la nature des matériaux assemblés: métaux ou alliages, matières plastiques, verre, etc.), soit par *chauffage*, soit par *pression*, soit par l'un et l'autre, avec ou sans emploi d'un produit d'apport dont la température de fusion convient au mode particulier de soudage utilisé.

SOUDURES HÉTÉROGÈNES

Définitions extraites du vocabulaire électrotechnique international.

Brasage

Opération consistant à assembler des pièces métalliques à l'aide d'un métal d'apport à l'état liquide ayant une température de fusion inférieure à celle des pièces à réunir et mouillant (1) le métal de base, qui ne participe pas par fusion à la constitution du joint.

— ***Brasage fort,*** brasage dans lequel un joint pelliculaire est obtenu avec un métal d'apport dont la température de fusion est supérieure à 450 °C.

— ***Brasage tendre,*** brasage dans lequel la température de fusion du métal d'apport est inférieure à 450 °C.

(1) Lors du dépôt d'une goutte de liquide sur un solide, on dit qu'il y a *mouillage* du solide si la goutte s'étale.

— **Soudo-brasage**

Brasage dans lequel l'assemblage est obtenu de proche en proche par une technique opératoire analogue à celle du soudage autogène par fusion, la température de fusion du métal d'apport étant supérieure à 450 °C.

a) **La soudure à l'étain** est constituée par un alliage d'étain et de plomb, dont le point de fusion varie, selon sa composition, entre 200 et 270 degrés C. Elle est surtout employée en ferblanterie et en petite cuivrerie.

b) **La brasure** est un alliage de cuivre et de zinc auquel est ajouté parfois de l'étain ou de l'argent. Son point de fusion varie, selon sa composition, entre 425 et 1 100 degrés C.

Le brasage se fait sur des pièces exécutées en cuivre, qualité chaudronnier, avec lequel il est impossible de réaliser une bonne soudure autogène ; il est utilisé également pour assembler les tubes de bicyclette et les brides d'acier sur tuyaux de cuivre.

c) La **soudo-brasure** pour l'acier et la fonte est constituée par un alliage du genre laiton contenant du silicium, et dont le point de fusion est situé entre 850 et 950 degrés C.

Le soudo-brasage se différencie du brasage par les particularités suivantes:

— il ne peut s'effectuer qu'à l'aide d'un chalumeau ;

— les pièces peuvent être assemblées bout à bout ou en angle, tandis que le brasage se fait généralement par recouvrement;

— pendant le soudo-brasage, les pièces sont chauffées à une température inférieure à celle de la fusion de la brasure, tandis que pendant le brasage, elles sont portées à une température supérieure.

Le soudo-brasage est très employé pour les réparations de pièces de toutes sortes en fonte, en acier, en bronze ou en cuivre, ainsi que pour le soudage de la tôle galvanisée et pour l'assemblage de métaux différents (acier-fonte, cuivre-acier).

Il s'applique également, ainsi que le brasage, sur l'aluminium et ses alliages ; le métal d'apport est alors un alliage d'aluminium à 5 ou 10 % de silicium.

Bien réalisés, les joints soudo-brasés présentent d'excellentes caractéristiques mécaniques, parfois égales ou même supérieures à celles des métaux assemblés.

SOUDURES AUTOGÈNES

La plus ancienne des soudures autogènes est la ***soudure à la forge.*** Employée autrefois pour souder les joints des cadres en profilés, elle est abandonnée en chaudronnerie depuis la découverte de la soudure au chalumeau.

Les différents procédés de soudage autogène pratiqués en chaudronnerie sont:

1° — Le soudage par fusion.

L'énergie calorifique provoquant la fusion est fournie soit par une flamme provenant d'un chalumeau, soit par un arc électrique, soit par plasma d'arc, par faisceaux d'électrons et, tout récemment, par laser.

Le soudage au chalumeau: la flamme est produite par la combustion de l'*acétylène* ou de l'*hydrogène* dans l'*oxygène.*

Ce procédé de soudage, très employé, convient à tous les métaux et alliages.

On emploie surtout le chalumeau ***oxyacétylénique;*** le chalumeau ***oxhydrique*** est réservé au soudage des métaux tendres, notamment du plomb.

Le soudage à l'arc électrique: la source calorifique est un arc électrique que l'on fait jaillir entre la pièce et la baguette de métal d'apport, appelée ***électrode.***

Ce procédé, qui comporte de nombreuses variantes, est le plus employé; il convient particulièrement au soudage des tôles épaisses en acier doux, aux profilés, à celui des aciers inoxydables et aux autres métaux et alliages.

2° — Le soudage par résistance électrique.

Ce procédé consiste à chauffer, par *effet Joule,* jusqu'à la température de soudage la surface de contact des pièces à souder et à effectuer par compression un forgeage du métal. On distingue.

A — Le soudage en bout

a) ***par résistance:*** la chaleur est engendrée par le passage d'un courant dans la résistance électrique du joint;

b) ***par étincelage:*** la chaleur est produite par l'entretien d'un *arc électrique* jaillissant entre les pièces.

B — **Le soudage par recouvrement**

a) ***soudure discontinue, par points*** à écartement variable réalisés au moyen de deux électrodes en cuivre ;

b) ***soudure continue,*** obtenue par chevauchement des points de soudure réalisés par des électrodes constituées par deux molettes tournantes.

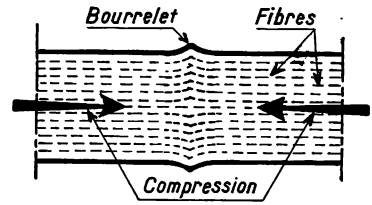


Fig. 9

L'effort de compression soude les deux pièces par forgeage et provoque un bourrelet tout autour de la soudure.

REMARQUES. — Le soudage en bout sans étincelage est réalisé uniquement par *forgeage sans fusion du métal* (fig. 9).

Dans le soudage par étincelage, les étincelles fondent les aspérités des pièces et élèvent rapidement la température des zones voisines qui fourniront les zones de *soudage par forgeage.*

Le soudage par points est effectué avec *fusion partielle* du métal, suivie de *forgeage* (fig. 10). Cependant, dans certains cas (acier inoxydable sur acier à haute résistance par exemple), il est recommandé de rechercher une soudure uniquement par forgeage afin d'éviter la dénaturation des métaux ou alliages dans le point.

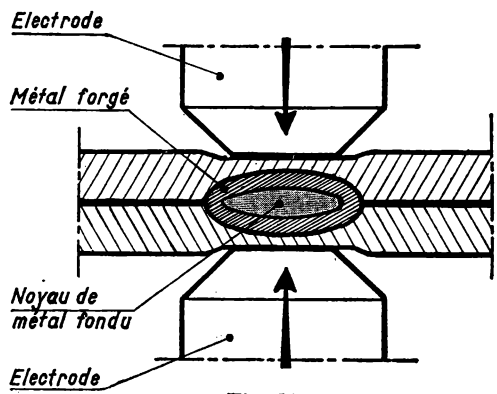


Fig. 10

La soudure est réalisée à la fois par fusion et par forgeage.

3° — Le soudage exécuté avec pression.

A — **Le soudage au gaz par pression.**

Ce procédé, de date récente, consiste à réaliser la soudure par forgeage du joint chauffé avec un chalumeau multiflamme et soumis à des pressions déterminées.

B — **Le soudage par friction.**

C — **Le soudage à froid.**

D — **Le soudage par ultrasons.**

CONSIDÉRATIONS SUR LES DIFFÉRENTS PROCÉDÉS D'ASSEMBLAGE

Parmi tous les procédés d'assemblage actuellement utilisés, les procédés de soudage autogène occupent une place prépondérante dans toutes les industries de construction métallique et de réparation.

Ils permettent, notamment en chaudronnerie, la conception et la réalisation d'ouvrages qu'il serait impossible d'exécuter par assemblage mécanique.

EXEMPLES. — Obtention rapide et facile, à partir d'éléments simples (tôles, plats, profilés), d'ensembles complexes qui remplacent avantageusement certaines pièces moulées (bâtis de machines); ouvrages en tôle très épaisse.

Ils rendent possible également la réparation de constructions mécaniques de toutes natures, mêmes rivées ou moulées, rompues, usées ou corrodées.

Ils offrent des garanties de sécurité élevées, tout en procurant des économies de temps d'exécution ainsi que de matières premières: un wagon de voyageurs a une masse de 33 tonnes en construction soudée contre 54 tonnes en construction rivée; ce gain de poids contribue à augmenter la vitesse des transports, tout en diminuant le coût de la construction.

Le soudage électrique (à l'arc et par résistance) s'est développé d'une façon prodigieuse et a supplanté le soudage au chalumeau; son champ d'action est plus étendu, son exécution plus rapide.

Le soudage sous flux électro-conducteur (chaleur dégagée à la fois par effet d'arc et par effet Joule) est de plus en plus employé pour le soudage automatique et semi-automatique.

Le soudage électrique en atmosphère inerte est très employé pour le soudage des métaux et alliages légers, des aciers inoxydables et réfractaires, du cuivre et de ses alliages, ainsi que du nickel et de ses alliages.

Le soudage électrique sous atmosphère de CO_2 est de plus en plus employé pour le soudage des aciers. Les soudures offrent sensiblement les mêmes qualités que celles exécutées sous atmosphère inerte pour un prix de revient bien inférieur.

Le soudage vertical sous laitier ou soudage électro-slag ouvre de nouvelles perspectives aux fabrications de récipients sous pression et de pièces mécaniques.

Par la possibilité de multiplier le nombre de fils-électrodes consommables, ce procédé permet l'assemblage des plus forts éléments d'acier réalisés par coulage ou forgeage.

Le soudage par points est d'une application courante pour les constructions sur tôles minces en acier doux, aciers inoxydables et surtout en alliages légers et alliages réfractaires (automobile, voitures de chemin de fer, aviation).

Le soudage par étincelage est employé pour l'assemblage de tôles, de tubes, de profilés; son usage s'accroît dans le soudage des aciers spéciaux, des alliages légers et réfractaires.

Récemment, les propriétés de l'arc électrique ont apporté des possibilités nouvelles en permettant la création des *courants de gaz chauds et ionisés*, dits *« flammes plasma »*, atteignant industriellement des températures de 20 000 °C.

Plasma : Un plasma est un milieu gazeux ionisé, dans lequel les concentrations électroniques et ioniques sont sensiblement égales, d'où résulte une charge spatiale presque nulle.

Le chalumeau à plasma d'arc est déjà couramment employé pour la *projection-métallisation, le rechargement et le coupage.* Avec ce chalumeau, il est théoriquement possible de couper tous les matériaux.

Le soudage par plasma d'arc vient de faire son entrée dans l'industrie où il se développe rapidement. Il permet de souder les aciers inoxydables, les cupronickels, le titane, le nickel, le zircaloy, l'inconel, etc. Il peut s'appliquer à partir d'épaisseurs très faibles (1/100^{e} *mm*) et sur des matériaux très peu conducteurs d'électricité.

Le soudage par bombardement électronique s'effectue dans une chambre à vide très poussé (jusqu'à 10^{-5} *torr* (1) au moyen d'un « *canon à électrons* » qui accélère et concentre les électrons en un faisceau qui libère la quasi-totalité de son énergie sous forme de chaleur en venant frapper une pièce métallique.

Dirigé sur un joint d'éléments à assembler, le faisceau d'électrons exécute des soudures profondes et étroites ne déformant pas les pièces. Il peut souder en une seule opération plusieurs joints situés dans le même alignement. Il peut encore souder au delà d'une paroi après l'avoir traversée.

Non seulement il n'y a pas d'oxydation ni d'inclusions d'oxyde dans le cordon de soudure, mais il y a une purification de la zone soudée qui résiste mieux à l'oxydation que le reste du métal.

Ce procédé permet de souder tous les métaux et alliages, y compris ceux dits « réfractaires », tels le molybdène, le tungstène, le titane, etc.

Actuellement on peut déjà souder, en utilisant de hautes tensions, des épaisseurs atteignant 150 *mm* sur aluminium et 100 *mm* sur acier.

On peut, dès maintenant, prévoir un développement considérable de ce procédé de soudage.

La flamme oxyacétylénique est surtout utilisée pour des travaux de soudage sur tôles minces et tuyauteries de faible diamètre en métaux ferreux ou non ferreux, pour le brasage et le soudo-brasage, ainsi que le préchauffage.

Le soudage par pression à froid, actuellement pratiqué pour l'assemblage homogène ou hétérogène sur l'aluminium et ses alliages, le plomb, le zinc, le cadmium, le laiton et le cuivre, est réalisé par une *pression localisée*, obtenue généralement par un poinçon à épaulement.

L'opération laisse une empreinte dont les dimensions sont $L = 6e$, $l = 2e$, profondeur $= 0{,}6e$ pour l'aluminium et $0{,}8e$ pour le cuivre dans le soudage par points à recouvrement.

Une soudure continue est obtenue par un outil de forme ou par des molettes.

(1) 1 *torr* est égal à la pression exercée par une colonne de mercure de 1 *mm* de hauteur et 1 *cm*^{2} de surface.

Des fils peuvent également être soudés bout à bout (formation d'un bourrelet). La pression à exercer est de l'ordre de 80 à 100 daN/mm^2 pour l'aluminium et de 100 à 120 daN/mm^2 pour le cuivre.

Ce procédé est appelé à se développer dans les industries chimiques, alimentaires, la décoration et l'emballage.

Le soudage par friction permet d'assembler deux pièces dont l'une, au moins, est de révolution. Cette dernière est animée d'un mouvement de rotation en prenant appui sur la pièce fixe.

Lorsque les deux pièces ont atteint la température de soudage, la rotation est arrêtée et on exerce une poussée axiale qui réalise la soudure par interpénétration granulaire.

Ce procédé permet de souder des pièces constituées de métaux de même nature ou de nature différente.

Le soudage par explosion peut réaliser, soit le placage *plan* d'un métal de revêtement sur un métal support (procédé employé avec des métaux ne pouvant pas se souder par ***colaminage),*** soit le placage *concentrique* intérieur ou extérieur d'un tube.

Les deux éléments à souder étant préalablement tenus écartés, la violence du heurt engendre un effet thermique et une expulsion gazeuse avec projection de métal fondu produisant un décapage des surfaces à souder.

Actuellement, ce procédé est surtout appliqué au soudage des tubes sur les plaques tubulaires.

Le soudage par ultrasons est actuellement limité aux industries de l'aéronautique et de l'électronique, mais il est appelé à se développer.

Sous l'effet des vibrations mécaniques dues aux ultrasons, les atomes des deux pièces à assembler diffusent les uns dans les autres sans modification de structure cristalline.

Les deux parties à réunir sont fortement comprimées entre un bâti et une tête mécanique reliée au dispositif *magnétostricteur* qui produit les ultrasons. L'assemblage se fait point par point.

Cette méthode est surtout employée pour assembler des métaux qui présentent de grandes difficultés de soudage par les méthodes classiques: cuivre, molybdène, tungstène, zirconium, etc. ; elle permet également l'assemblage de deux pièces faites de métaux différents.

Le ***collage*** est très employé pour assembler des pièces d'aluminium ou d'alliages légers, soit entre elles, soit avec des matériaux divers (bois, caoutchouc, matière plastique, etc.) Il ne dégrade pas les caractéristiques du métal; il n'entraîne aucune déformation des pièces. En construction aéronautique, les assemblages collés sont devenus d'usage courant en raison de leurs qualités de légèreté et de résistance mécanique.

CHAPITRE II

LES ASSEMBLAGES DÉMONTABLES

Le boulonnage

En chaudronnerie, le boulonnage est employé à deux fins:

1° pour assembler provisoirement deux pinces ou deux pièces avant rivetage. On emploie, dans ce cas, des *boulons de montage* que l'on fixe de place en place pour éviter tout déplacement des éléments à assembler ;

2° pour réunir solidement entre elles deux pièces, tout en réalisant un assemblage démontable.

Les boulons

Un boulon est un ensemble constitué par une *tige filetée* portant une *tête* à une extrémité et un élément démontable, l'*écrou*, qui se visse à l'autre extrémité.

SELON LE PROCÉDÉ DE FABRICATION, UN BOULON EST DIT:

— *brut*: la tête est telle qu'elle a été forgée par refoulement de la tige ;
— *décolleté* (symbole D), il est entièrement usiné sur le tour ;
— *forgé à froid et pris dans du rond calibré* (symbole N) ;
— *forgé à chaud et le corps tourné* (T) ;
— *forgé à chaud et usiné partout* (U).

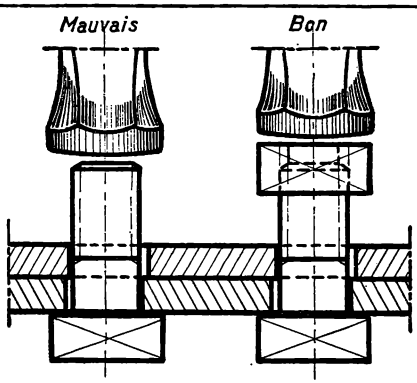


Fig. 1
Les premiers filets sont écrasés.

Fig. 2
Les premiers filets sont protégés.

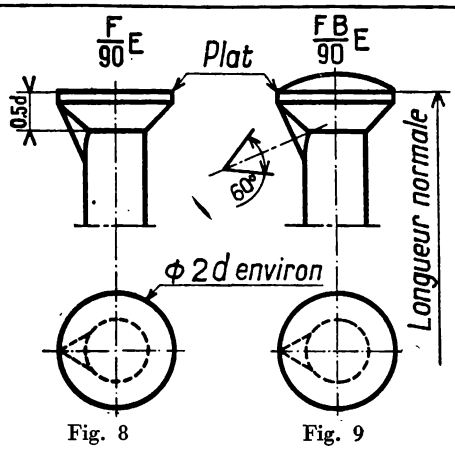


Fig. 8 Fig. 9

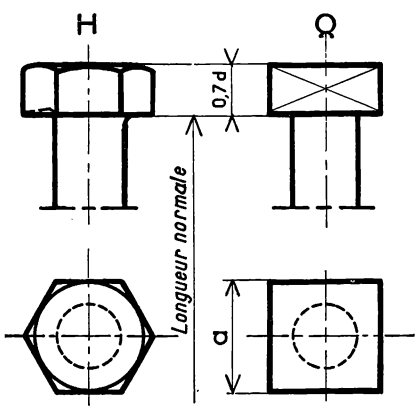


Fig. 3 Fig. 4

Valeur de a pour boulons H et Q

a = 1,4 d + 1 mm de 3 à 6
+ 2 mm de 7 à 8
+ 3 mm de 9 à 11
+ 4 mm à partir de 12

Les boulons R $\frac{F}{90}$ et $\frac{FB}{90}$ ont un plat pour éviter les bavures et les blessures.

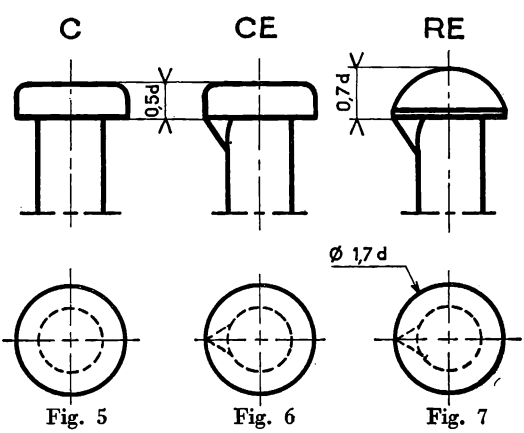


Fig. 5 Fig. 6 Fig. 7

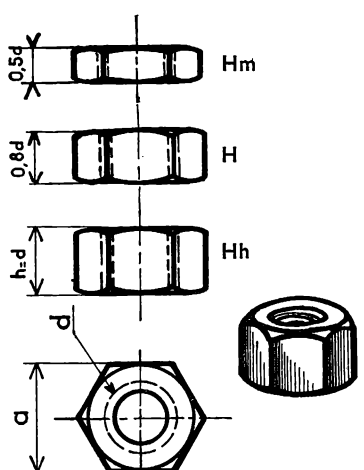


Fig. 10

LES BOULONS DE MONTAGE

Ce sont des boulons bruts, à tête et écrou carrés; *la section du filet est ronde* (moins fragile que le filet triangulaire), *le pas plus grand que le pas normal* pour augmenter la rapidité du vissage et du dévissage.

Quand on n'a pas de boulons spéciaux de montage, on emploie des boulons normaux usagés ; leurs filets s'usent rapidement, il faut périodiquement les refaire à l'aide d'une filière.

Pour retirer un boulon coincé, il faut éviter de frapper directement sur la tige filetée, ce qui provoquerait l'écrasement des premiers filets et rendrait difficile ensuite le passage de la filière. Les coups de marteau doivent être portés sur l'écrou qu'on a pris soin de laisser engagé dans quelques filets (fig. 1 et 2).

LES BOULONS NORMAUX D'ASSEMBLAGE (1)

La forme de leur tête peut être:

hexagonale,	symbole	H	de	3 à 80	*mm*	de	diamètre	(fig. 3)
carrée	»	Q	»	3 à 80	*mm*	»	»	(fig. 4)
cylindrique	»	C	»	3 à 60	*mm*	»	»	(fig. 5)
ronde	»	R	»	3 à 60	*mm*	»	»	
fraisée	»	$\frac{F}{90}$	»	3 à 60	*mm*	»	»	
fraisée-bombée	»	$\frac{FB}{90}$	»	3 à 60	*mm*	»	»	

Pour serrer énergiquement un boulon ou pour le desserrer, il faut immobiliser la tige en rotation. Les boulons H et Q sont immobilisés en tenant leur tête avec une clé; les boulons C, R, F, FB ont généralement leur tête munie d'un ***ergot*** (symbole E) qui se logera dans une encoche ménagée dans la pièce. On obtient les boulons CE (fig. 6), RE (fig. 7), $\frac{F}{90}\ E$ (fig. 8), $\frac{FB}{90}\ E$ (fig. 9).

LES ÉCROUS NORMALISÉS

L'écrou le plus couramment employé est hexagonal (symbole H). Ses deux faces sont chanfreinées, il se fait en trois types:

écrou usuel	(symbole H)	de hauteur	$h = 0{,}8\ d$;
écrou haut	(symbole Hh)	» »	$h = d$;
écrou bas	(symbole Hm)	» »	$h = 0{,}5\ d$ (fig. 10).

(1) Boulons à serrage sur métaux.

Il existe des boulons à serrage sur bois dont la largeur des têtes est plus grande afin de répartir l'effort de serrage sur une plus grande surface et d'éviter ainsi la détérioration du bois.

Autres écrous courants:

carré: *Q* (fig. 11); ***cylindrique:*** *C;* ***à embase*** (pas de symbole) (fig. 12), celle-ci augmente la surface d'appui de l'écrou; ***à créneaux:*** normal *HK* ($h = d$), haut *HKL* ($h = 1{,}5\ d$) (fig. 13), les rainures servent de logement à une goupille, soit conique, soit fendue.

borgne (pas de symbole): terminé par une calotte sphérique qui protège l'extrémité de la vis contre les chocs, et assure l'étanchéité du filetage (fig. 14).

à oreilles O, celles-ci permettent de le serrer à la main; il est matricé ou moulé en fonte malléable (fig. 15).

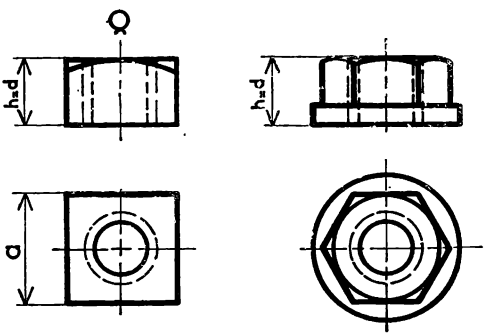


Fig. 11 Fig. 12

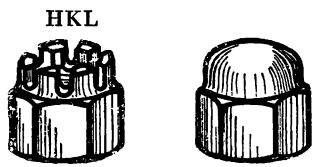


Fig. 13 Fig. 14

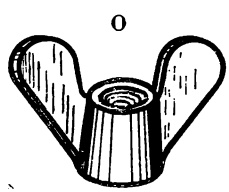


Fig. 15

DISPOSITIFS DE BLOCAGE DE L'ÉCROU

Lorsqu'un écrou est fortement serré sur une pièce, il y a contact énergique à la fois entre l'écrou et la pièce et entre les filets de la vis et ceux de l'écrou (fig. 16). Le frottement qui en résulte rend théoriquement le desserrage impossible, cependant il devient insuffisant quand les pièces sont soumises à des chocs ou à des vibrations qui suppriment, par moment, le contact.

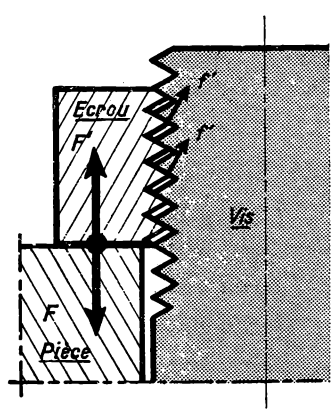


Fig. 16

La vis est soumise à un effort d'extension.

On cherche à éviter le desserrage des écrous:

1° *en améliorant le contact entre la pièce et l'écrou* par une *rondelle plate* qui répartit sur une plus grande surface (fig. 33) la force pressante exercée par l'écrou.

2° *en maintenant le contact entre les filets de la vis et ceux de l'écrou;* on emploie à cet effet:

a) *la rondelle Grower* (fig. 17 et 18) (symbole W): hélicoïdale, en acier trempé, de section carrée. Elle agit comme ressort. Ses extrémités s'enfoncent légèrement dans l'écrou et dans la pièce, opposant ainsi une résistance supplémentaire au desserrage. Choisir une rondelle «*à gauche*» pour les filetages à droite et une rondelle « *à droite* » pour les filetages à gauche ;

Fig. 17

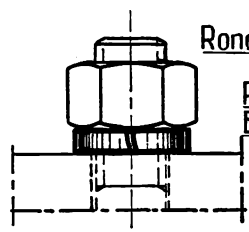


Fig. 18

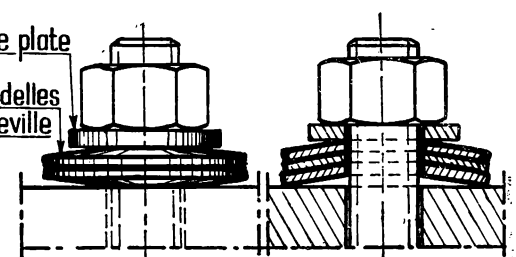


Fig. 19

Fig. 20

b) *la rondelle Belleville :* de forme tronconique, elle assure, par déformation élastique, une pression constante entre les filets de l'écrou et ceux de la tige filetée. Elle est rarement employée seule ; on en place deux en opposition, ou plusieurs empilées (fig. 19 et 20) ;

c) *le contre-écrou* (fig. 21): c'est un écrou que l'on bloque sur un premier écrou, lui-même peu serré sur la pièce. Sous l'effet de la traction exercée par le contre-écrou sur la vis, les filets de celle-ci sont fortement appliqués par leur flanc inférieur sur ceux du contre-écrou et par leur flanc supérieur sur ceux de l'écrou. Au voisinage du plan

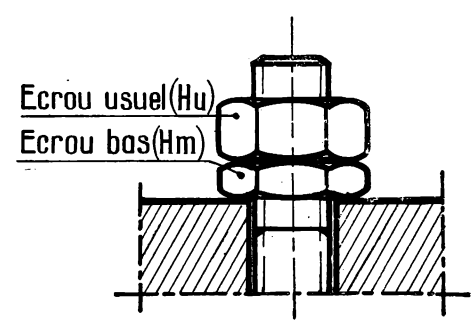


Fig. 21

de séparation de l'écrou et contre-écrou, se produit donc un contact qui supprime totalement le jeu entre les filets de la vis et ceux de l'ensemble écrou - contre-écrou. Ce contact persiste même si les vibrations provoquent la création d'un jeu entre la pièce et l'écrou, et celui-ci ne peut donc se desserrer (fig. 22).

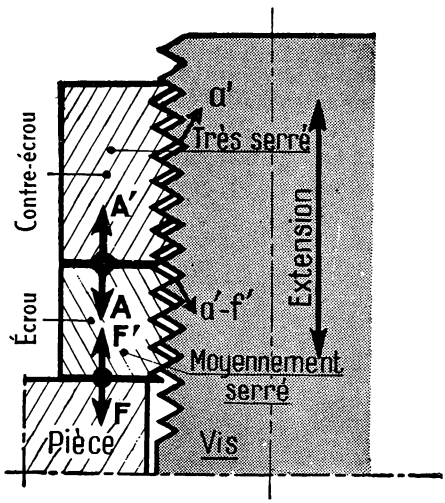


Fig. 22

On conçoit que la pression ainsi réalisée entre les filets, et qui dépend essentiellement du contre-écrou, sera d'autant plus forte que celui-ci comptera plus de filets par rapport à ceux de l'écrou, qui s'oppose à son action. On aura donc intérêt, contrairement à l'usage courant, à prendre pour écrou un écrou plus bas que le contre-écrou.

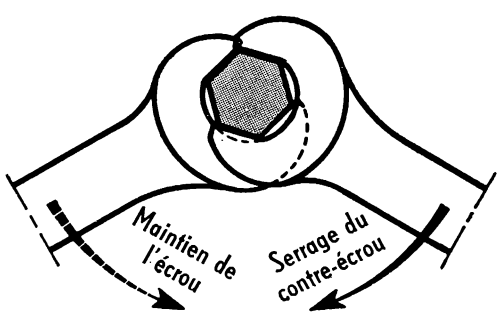


Fig. 23

MÉTHODE DE SERRAGE. — 1. Serrer moyennement l'écrou. - 2. Maintenir l'écrou avec une clé pour éviter qu'il ne se serre plus fortement et serrer énergiquement le contre-écrou avec une autre clé (fig. 23).

3° *en augmentant le frottement entre la vis et l'écrou*

a) par l'emploi d'*écrous fendus* (fig. 24 et 25) ;

b) en faisant *pression sur le filet* (fig. 26).

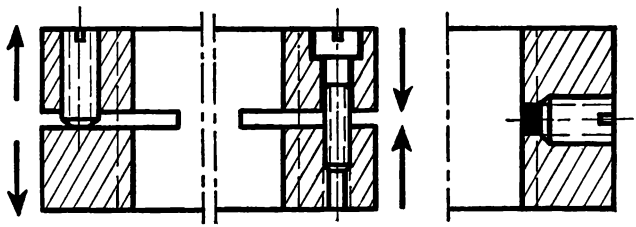


Fig. 24 Lèvres écartées

Fig. 25 Lèvres rapprochées

Fig. 26 Pastille de cuivre

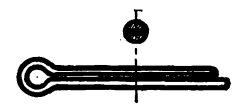


Fig. 27 Les branches inégales facilitent l'écartement

4° *au moyen de goupilles*

a) *fendues* (symbole V) (fig. 27), elles se montent soit dans deux rainures d'un écrou HK (fig. 28), soit au-dessus d'un écrou H (fig. 29) ;

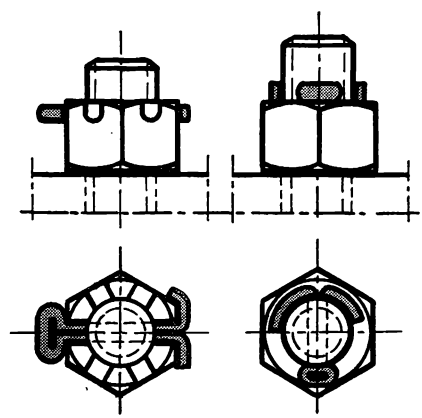


Fig. 28 Fig. 29

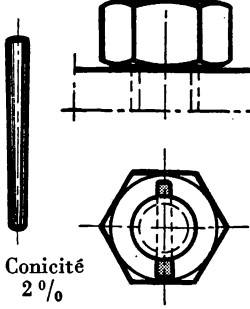


Fig. 30

Fig. 31

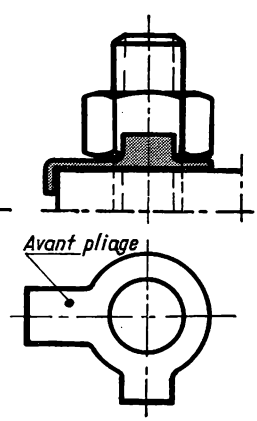


Fig. 32

b) *coniques* (symbole *I*) (fig. 30), elles traversent la tige seule (fig. 31) ou la tige et l'écrou.

5° *au moyen de plaquettes arrêtoirs* en acier doux, cuivre ou laiton ; de formes diverses, elles prennent appui sur la pièce et se rabattent sur l'écrou (fig. 32).

CALCUL DE LA LONGUEUR DES BOULONS — EXEMPLES DE COMMANDE

Un boulon est caractérisé par :

— sa matière,

— la forme de sa tête,

— le diamètre de son corps,

— la longueur de la tige (prise sous tête sauf pour les têtes fraisées et fraisées-bombées),

— la longueur de la partie filetée,

— le procédé de fabrication,

— la forme de l'écrou.

La longueur L se détermine en additionnant l'épaisseur à serrer E, la hauteur de l'écrou et, éventuellement, celle de la ou des rondelles ou du contre-écrou ; on ajoute 3 à 5 *mm* au nombre obtenu et on arrondit à la longueur normalisée immédiatement supérieure (fig. 33).

NOTA. — Si la tige est goupillée (fig. 28-29, 31), l'axe de la goupille doit être à une distance $e \geqslant \frac{3}{4} d$ de l'extrémité afin d'éviter la rupture longitudinale de la tige.

EXEMPLES. — *a)* boulon ***H 15.50/35 :***

H désigne une tête hexagonale, 15 le diamètre, 50 la longueur sous tête, 35 la longueur filetée, l'écrou est normal (H);

b) boulon $\frac{\text{FB}}{90}$ ***E 10.40/20 écrou Q :***

tête fraisée bombée, avec ergot, de 10 de diamètre, 40 de tige (tête comprise), partie filetée de 20, avec un écrou carré.

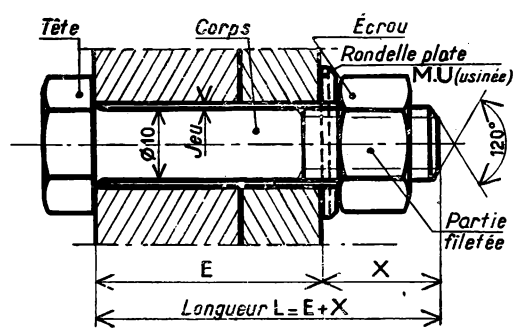


Fig. 33

Boulon H 10.45/20
Écrou Hh 10
Rondelle MU 10

POSE DES BOULONS

Afin que tous les boulons soient sensiblement soumis au même effort et que, s'il y a un joint, celui-ci soit écrasé uniformément, il faut procéder comme suit :

1° mettre tous les boulons en place sans les serrer ;

2° les serrer modérément en adoptant l'ordre indiqué par les figures 34 et 35 ;

3° les serrer à bloc dans le même ordre.

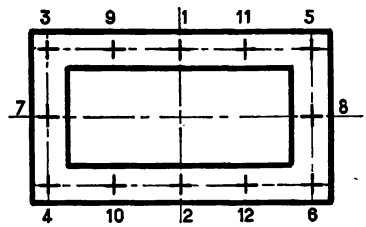


Fig. 34

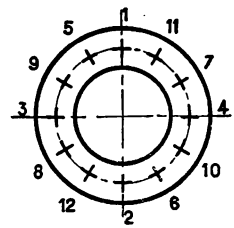


Fig. 35

Les clés à écrous

Les écrous sont serrés et desserrés au moyen de clés à ouverture fixe ou variable.

LES CLÉS PLATES A OUVERTURE FIXE

Elles sont à recommander en raison de l'aisance et de la sécurité de leur emploi: leur ouverture a1 correspond à l'entre-pans a de l'écrou augmenté d'un jeu permettant à la clé de se placer aisément sur l'écrou sans toutefois glisser sur ses arêtes ; de plus, leur longueur est établie en fonction de l'effort à exercer pour obtenir un serrage correct.

Enfin, l'inclinaison de l'axe de la tête sur celui de la poignée (15° environ), permet, en retournant la clé à chaque reprise, de serrer par ½ tour.

On les désigne par la largeur *a* de l'écrou ; elles peuvent être *simples* (clé de 17) ou *doubles* (clé de 21-22) (fig. 36). Voici quelques valeurs de *a* en fonction du diamètre *d* du boulon :

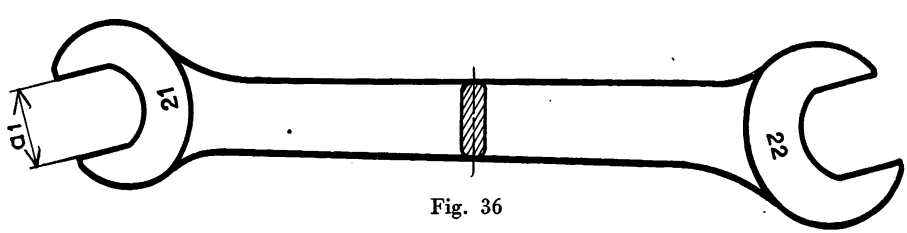


Fig. 36

d	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	27	30	33	36	39	42	45	48
a	10	14	17	21	23	26	29	32	35	38	42	46	50	54	58	63	67	71

LES CLÉS EN TUBES, DROITES OU COUDÉES (fig. 37) ET LES CLÉS A PIPE (fig. 38).

Elles permettent de serrer certains écrous qu'il est impossible d'atteindre avec une clé plate.

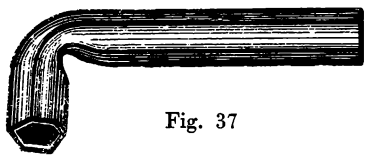


Fig. 37

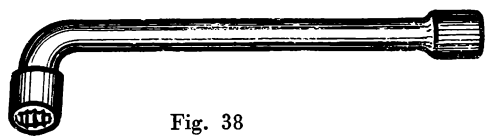


Fig. 38

LES CLÉS A OUVERTURE RÉGLABLE

Elles permettent le serrage et le desserrage d'écrous de grosseurs différentes, mais elles sont plus lourdes que les clés à ouverture fixe et n'ont pas la même précision d'ouverture. Les plus employées sont les **clés à molette,** genre *Crescent* (fig. 39).

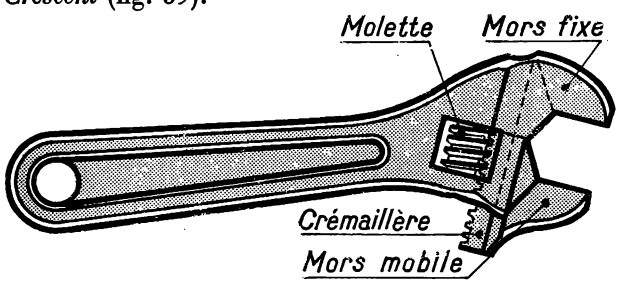


Fig. 39

Clé à molette type « Crescent »

LES CLÉS DYNAMOMÉTRIQUES

Les boulons et vis d'assemblage d'éléments soumis à de fortes pressions doivent, après serrage, être *tous soumis à la même tension,* celle-ci étant déterminée avec précision. L'appréciation de cette tension ne peut être obtenue qu'avec une clé dynamométrique, clé munie d'un cadran qui enregistre le couple exercé par la tête de serrage.

Une gamme complète de clés dynamométriques (chaque clé peut recevoir une série de douilles) permet de couvrir l'ensemble des besoins à partir de quelque 0,1 *m.N* jusqu'à 5600 *m.N.*

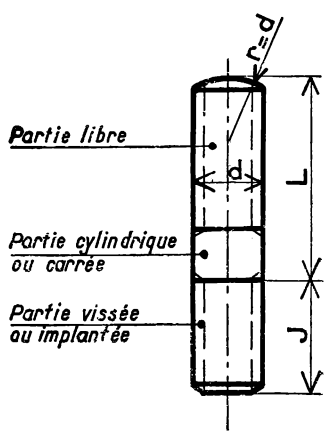


Fig. 40

L'extrémité implantée est chanfreinée.
L'extrémité libre est bombée.
J = 1,5 *d* pour les métaux durs.
J = 2 à 3 *d* pour les métaux tendres.

Les goujons

Un goujon est une tige cylindrique filetée à ses deux extrémités, l'une d'elles est vissée (*implantée*) dans un trou, borgne ou non, taraudé dans la pièce. Les deux parties filetées sont séparées par un espace lisse cylindrique, ou parfois prismatique à section carrée (fig. 40).

Le vissage des goujons se fait à l'aide d'une clé soit directement si le corps est prismatique, soit par l'intermédiaire d'un écrou et d'un contre-écrou bloqués si le corps est cylindrique.

DÉSIGNATION

EXEMPLE. — Un goujon de ***10.25/20*** est un goujon brut ayant un diamètre de 10, une longueur libre *L* de 25 avec une partie filetée de 20.

Si l'on désire un corps tourné, on ajoute le symbole ***T (10.25/20 T)***.

Pour les goujons destinés à être implantés dans un métal tendre, on cote *J*.

REMARQUE. — De plus en plus, les goujons sont fixés sur la pièce par soudage électrique au moyen d'un pistolet spécial. Ce procédé permet de supprimer la partie implantée du goujon et, corrélativement, le perçage et le taraudage de la pièce. La soudure s'exécute en une fraction de seconde (voir chapitre soudage à l'arc électrique).

Les vis

Une vis est une tige filetée portant généralement une tête ; *elle se fixe directement dans la pièce taraudée* qui forme écrou. C'est donc la vis elle-même qui tourne pour sa mise en place ou son enlèvement.

Comme les boulons, les vis sont désignées par la forme de leur tête. Les principales vis à métaux sont représentées par les figures 41 à 47.

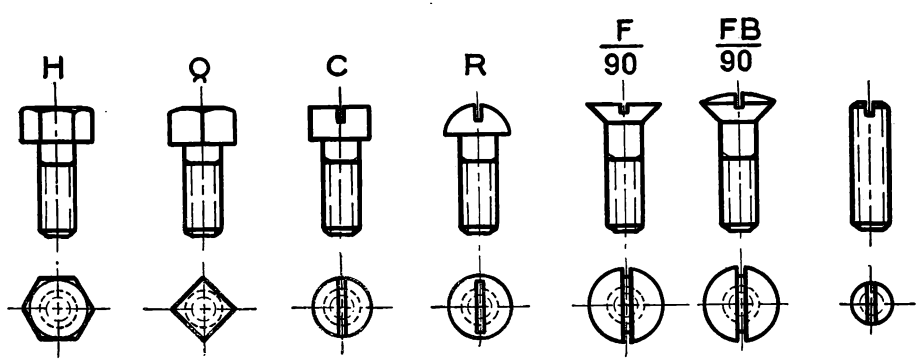


Fig. 41 Hexagonale — Fig. 42 Carrée — Fig. 43 Cylindrique — Fig. 44 Ronde — Fig. 45 Fraisée à 90° — Fig. 46 Fraisée bombée — Fig. 47 Sans tête.

Pour réaliser un assemblage résistant, la partie implantée des vis se détermine par rapport au diamètre comme pour les goujons (fig. 40).

Les vis à tête prismatique se serrent avec une clé, les autres avec un tournevis (fig. 48 à 53).

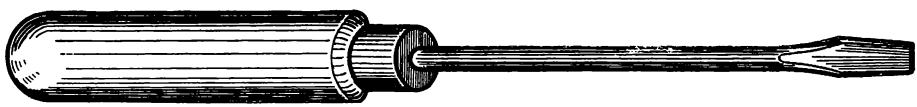


Fig. 48

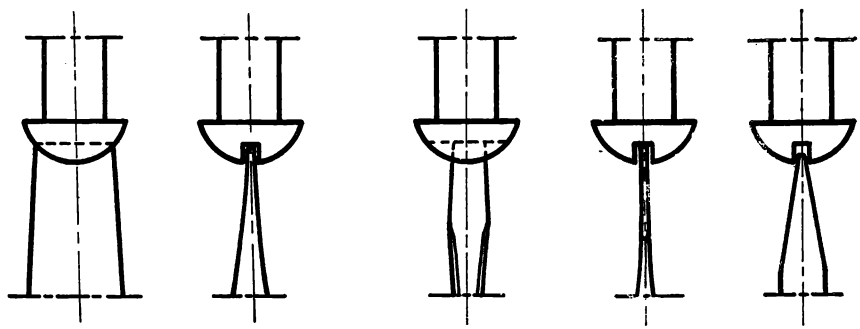


Fig. 49 — Bon — Largeur et épaisseur correctes.

Fig. 50 — Trop étroit.

Fig. 51 — Mauvais — trop mince.

Fig. 52 — Trop épais.

Fig. 53

Les vis parker (fig. 54), employées pour l'assemblage de tôles minces (carrosserie, meubles métalliques, etc.) sont des *vis autotaraudeuses* en acier résistant, à pas rapide. La vis est introduite dans un trou d'un diamètre inférieur au sien en la vissant sous un effort de pression; les filets tracent leur chemin dans la tôle et leur adhérence entre les parois assure l'assemblage.

Fig. 54

CHAPITRE III

TARAUDAGE ET FILETAGE

Généralités

L'emploi des vis conduit le chaudronnier à pratiquer le taraudage, c'est-à-dire à exécuter des sillons hélicoïdaux nommés filets dans les trous destinés à les recevoir. Les trous taraudés font office d'écrous.

Le chaudronnier pratique aussi le filetage, opération qui consiste à exécuter des filets sur des tiges cylindriques (fers ronds ou tubes) (1).

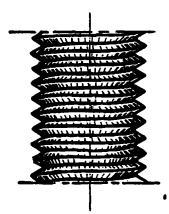


Fig. 1

LE FILET NORMALISÉ EST LE FILET ISO (*International Système Organisation*) qui a remplacé le filet SI (*Système International*).

Le profil du filet *ISO* (fig. 1 et 7) est un triangle équilatéral tronqué de $\frac{H}{4}$ au sommet $\left(\frac{H}{8}\right.$ pour le filet *SI*$\left.\right)$ et de $\frac{H}{16}$ à la base $\left(\frac{H}{16}\right.$ également pour le filet *SI*$\left.\right)$ (fig. 7 bis).

La hauteur H du triangle équilatéral est égale à la base $\times \frac{\sqrt{3}}{2}$. Par suite des troncatures, la hauteur réelle du filet *ISO* de la vis et de l'écrou est égale à

$$H - \left(\frac{H}{4} + \frac{H}{16}\right), \text{ soit } H - \frac{5H}{16} = \frac{11H}{16}.$$

La hauteur réelle du filet *SI* est égale à $H - \left(\frac{H}{8} + \frac{H}{16}\right)$ soit $H - \frac{3H}{16} = \frac{13H}{16}$

Il s'ensuit qu'un écrou *ISO* dont la hauteur des filets est $\frac{11H}{16} < \frac{13H}{16}$ peut se visser sur une vis *SI de même diamètre nominal et de même pas*, alors qu'un écrou *SI* ne peut se visser sur une vis *ISO*, sauf si son avant-trou a été réalisé à un diamètre supérieur au diamètre théorique, ce qui est généralement le cas.

Diamètre nominal : c'est le diamètre extérieur des filets de la vis. On désigne les vis par leur diamètre nominal, exemple: vis de 10.

Pas : c'est l'intervalle entre deux filets, mesuré parallèlement à l'axe de la vis. Il est égal au côté du triangle équilatéral. Le pas normal est à « droite »

(1) Les tubes sont filetés au pas du gaz, dérivé du pas anglais Whitworth.

(le filet s'enroule dans le sens des aiguilles d'une montre en s'éloignant de l'observateur (fig. 2 et 3).

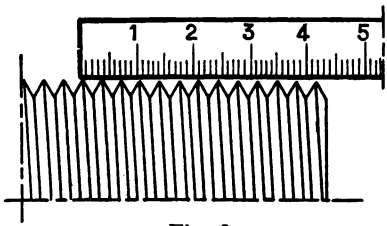


Fig. 2

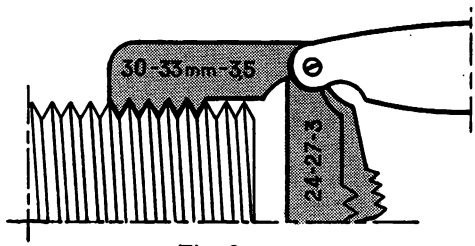


Fig. 3

Mesure du pas

a) *au réglet gradué*

Compter 10 filets et prendre le $\frac{1}{10}$ de la mesure.

Exemple: $\frac{35}{10}$ mm P = 3,5

b) *au calibre de filetage (jauge)*

Lecture directe sur le calibre s'adaptant exactement au filetage.

AUTRES FILETS

a) **filet carré** (fig. 4), d'une exécution délicate, est très résistant ; il est employé pour les vis soumises à de grands efforts (vis d'étau, de presse, etc.) ;

b) **filet trapézoïdal** (fig. 5), très résistant, moins difficile à exécuter que le filet carré ;

c) **filet rond** (fig. 6), d'une exécution délicate, il est peu employé (boulons de montage).

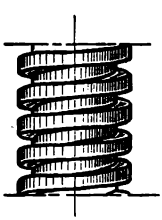


Fig. 4

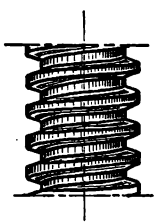


Fig. 5

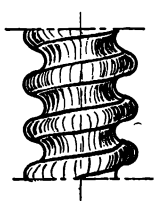


Fig. 6

LE TARAUDAGE

Le taraudage s'exécute à l'aide de *tarauds*, outils formés par des tiges filetées en acier trempé dans lesquelles des rainures (ordinairement 4) forment avec les filets ainsi interrompus des arêtes tranchantes ; celles-ci taillent un copeau qui se dégage par les rainures.

OPÉRATIONS

I° — Exécution de l'avant-trou.

Si nous désignons par d le diamètre nominal de la vis et par d_1 le diamètre de perçage, la figure 7 nous indique que :

$$d_1 = d - 2 \times \frac{5\,H}{8} \qquad \text{or } H = p\,\frac{\sqrt{3}}{2} \text{ d'où :}$$

$$d_1 = d - p\,\frac{\sqrt{3}}{2} \times \frac{10}{8} = d - p\left(0{,}866 \times \frac{5}{4}\right), \text{ soit}$$

$$\boxed{d_1 = d - 1{,}082\,p}$$

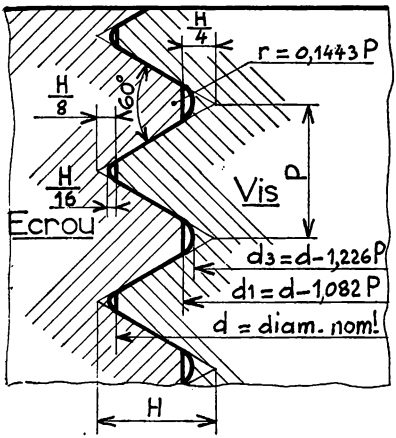


Fig. 7 — Filetage ISO

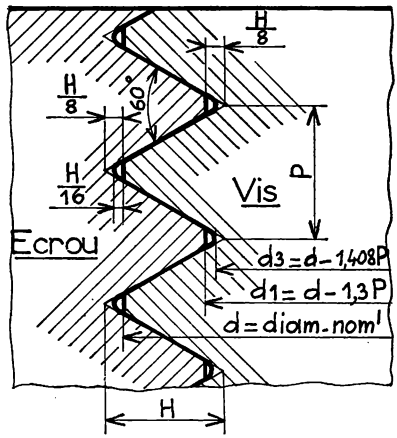


Fig. 7 bis — Filetage SI

Cette formule est adoptée pour le filetage intérieur sur le tour, elle ne convient pas pour le taraudage à l'aide de tarauds, car, avec ces outils, il se produit un glissement de métal vers l'intérieur. On adopte ordinairement $d\,t = d$ nominal $- p$ (pas).

Le tableau ci-après donne les pas *ISO* en fonction du diamètre nominal et les diamètres de perçage pour le taraudage.

Diamètre nominal	Pas	Diamètre de perçage	Diamètre nominal	Pas	Diamètre de perçage
3	0,5	2,5	24	3	21
4	0,7	3,3	27	3	24
5	0,8	4,2	30	3,5	26,5
6	1	5	33	3,5	29,5
8	1,25	6,8	36	4	32
10	1,5	8,5	39	4	35
12	1,75	10,3	42	4,5	37,5
14	2	12	45	4,5	40,5
16	2	14	48	5	43
18	2,5	15,5	52	5	47
20	2,5	17,5	56	5,5	50,5
22	2,5	19,5	60	5,5	54,5

Remarque. — Comme il a été indiqué précédemment, un écrou *ISO* peut se visser sur une vis *SI* mais seulement à partir d'un diamètre de 6 *mm* car, en dessous de ce diamètre, le pas du filetage *SI* est différent du pas du filetage *ISO*. Le tableau suivant donne les pas et diamètres de perçage pour les filets *SI:*

Diamètre nominal	Pas	Diamètre de perçage
3	0,6	2,4
4	0,75	3,3
5	0,9	4,1

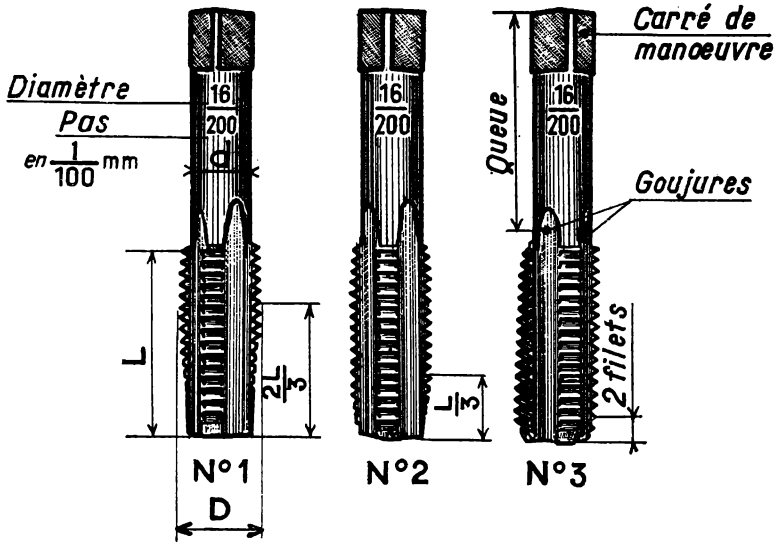


Fig. 8 — Tarauds courts à main.

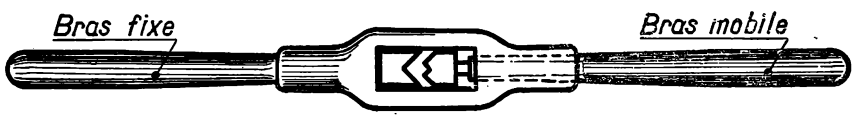


Fig. 9

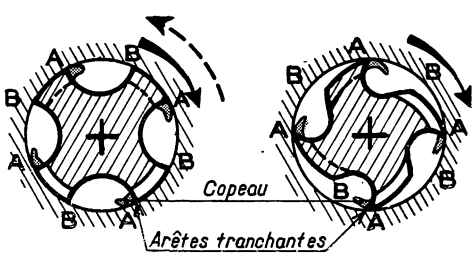
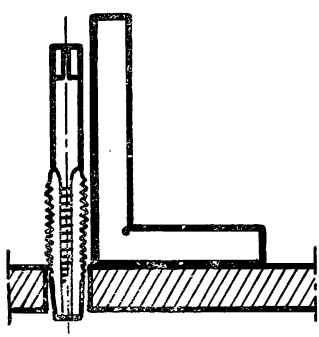


Fig. 11 Fig. 12



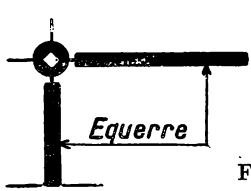


Fig. 10

Section des tarauds

à filets concentriques. En revenant en arrière la partie B brise le copeau.

à filets dépouillés. En revenant en arrière le copeau pourrait se coincer dans la partie dépouillée et casser le taraud.

2° — Exécution des filets.

A — Taraudage à la main.

L'opération se fait généralement en trois passes pour lesquelles on utilise un jeu de trois tarauds (fig. 8):

1° ***le taraud ébaucheur*** d'un diamètre légèrement inférieur au diamètre définitif, il est tronconique sur les deux tiers de sa longueur ;

2° ***le taraud intermédiaire*** d'un diamètre égal au diamètre définitif, il est tronconique sur un tiers de sa longueur ;

3° ***le taraud finisseur*** qui n'a qu'une troncature d'entrée intéressant deux filets.

REMARQUE. — On n'utilise le taraud finisseur que lorsqu'on ne peut pas faire passer le taraud intermédiaire à travers la pièce.

Les tarauds à main se manœuvrent à l'aide du ***tourne-à-gauche,*** simple ou réglable (fig. 9).

Au début du taraudage, il faut veiller à ce que l'axe du taraud ébaucheur soit perpendiculaire à la surface de la pièce (fig. 10) ; on exerce une légère pression axiale pour amorcer les premiers filets, on continue ensuite à tourner le taraud qui descend de lui-même en creusant les filets.

Les tarauds ordinaires sont à ***filets concentriques*** (fig. 11) (aucune dépouille); on les manœuvre en les faisant revenir en arrière périodiquement pour casser le copeau (*dévirer*).

Les tarauds à ***filets dépouillés*** donnent des filets plus nets ; il faut les tourner toujours dans le même sens (fig. 12).

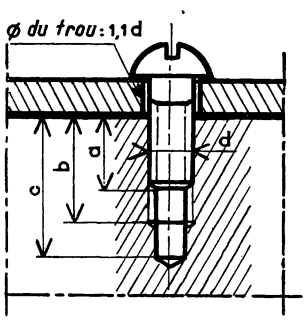


Fig. 13

a: implantation
b: longueur du taraudage = a + 4 à 5 p
c: profondeur du trou = b + 4 à 15 mm suivant d.

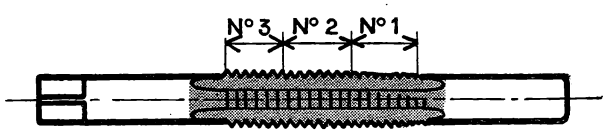


Fig. 14

Taraud à guides longs.

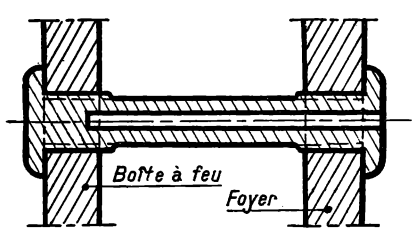


Fig. 15

Pour assurer un bon assemblage par vis dans un trou borgne il faut, chaque fois que cela est possible, tarauder la pièce à une profondeur supérieure à celle du vissage. L'avant-trou sera plus profond que la longueur taraudée afin d'éviter le coincement du taraud au fond du trou et, par suite, sa rupture (fig. 13).

Tarauds spéciaux pour entretoises de foyers de locomotives (fig. 14).

Ils sont utilisés pour tarauder en une seule opération les parois de la *boîte à feu* et du *foyer* réunies par des *entretoises* (fig. 15).

Afin d'obtenir un alignement rigoureux des trous, on emploie ***des tarauds longs dont l'extrémité constitue un alésoir*** (fig. 16).

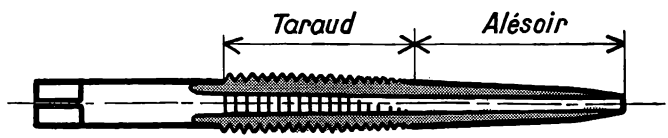
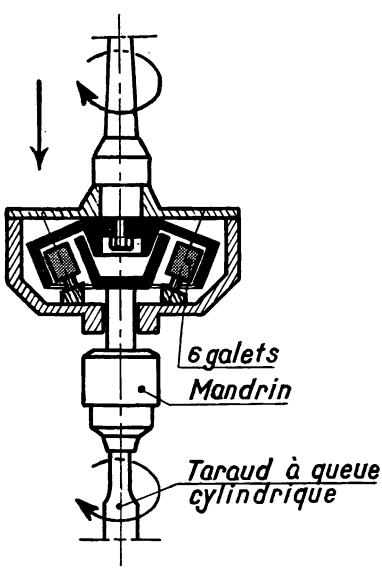


Fig. 16

B — Taraudage mécanique.

Le taraudage en série se fait à la machine à percer, fixe ou portative. Le taraud est serré dans un *mandrin spécial* qui le fait tourner à droite ou à gauche selon que l'effort axial est exercé dans un sens ou dans l'autre (fig. 17). On évite ainsi le bris des tarauds contre le fond des trous borgnes.



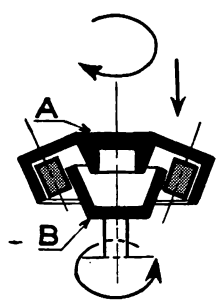


Fig. 17

Le cône A entraîne par friction le cône porte-mandrin B dans le sens direct et à la vitesse de la broche (taraudage). L'action des galets entraîne le cône B en sens inverse du précédent et à une vitesse supérieure (dégagement du taraud).

LUBRIFICATION DES TARAUDS

Pendant le taraudage, il faut lubrifier abondamment. On emploie ordinairement l'huile soluble ou l'huile de coupe pour les aciers au carbone.

L'huile de colza additionnée de blanc de Meudon qui donne du mordant, ou simplement du blanc de Meudon délayé dans l'eau, donnent de bons résultats pour le taraudage mécanique.

Employer :

le *pétrole* pour les aciers inoxydables ;

l'*huile de coupe* pour l'aluminium ;

l'*huile soluble* pour le duralumin, le bronze, le laiton et la fonte malléable ;

l'*huile de lin* additionnée de céruse pour le cuivre.

La fonte se taraude à sec, il faut refroidir le taraud à l'air.

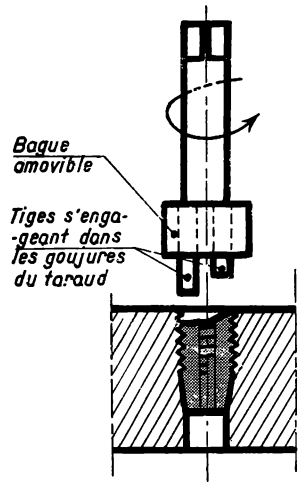


Fig. 18

EXTRACTION DES TARAUDS BRISÉS

On perce le taraud, *préalablement recuit*, au diamètre de l'avant-trou de taraudage. S'il est impossible d'effectuer le recuit (pièce épaisse, taraud en acier rapide), on emploie un ***extracteur*** (fig. 18) ou un appareil opérant par *désintégration électrique;* principe de l'***usinage par étincelage:*** l'électrode-outil et la pièce à usiner sont reliées chacune à une borne d'une source de courant à basse tension et haute intensité. A chaque interruption de contact entre l'outil et la pièce, des particules sont arrachées à celle-ci.

LE FILETAGE

Il s'exécute à l'aide de ***filières*** dont les principaux types sont:

LES FILIÈRES RONDES

Ce sont des écrous en acier trempé dans lesquels des trous interrompent les filets pour former avec eux des arêtes tranchantes. Les copeaux se dégagent par les trous. Une conicité obtenue par troncature des premiers filets donne de l'entrée à la filière (fig. 19).

Afin de permettre le calibrage précis du filetage, ces filières sont rendues *légèrement extensibles* par une vis conique qui fait varier l'ouverture de la fente et, par conséquent, le diamètre du filetage.

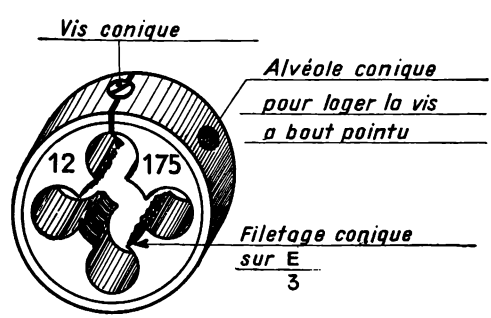


Fig. 19

Les filières sont manœuvrées à l'aide d'un ***porte-filière*** (fig. 20), dans lequel elles sont fixées par une vis à bout pointu s'engageant dans un alvéole conique.

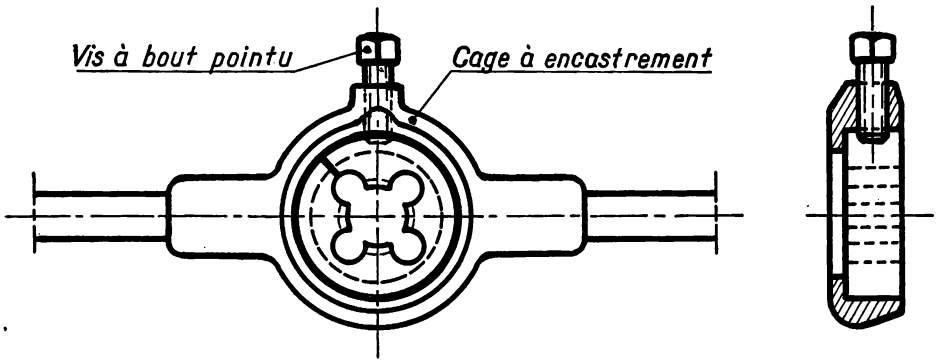


Fig. 20

Les filières rondes sont simples, peu encombrantes, mais elles exécutent le filet en une seule passe, ce qui rend pénible le filetage de tiges de gros diamètres.

LES FILIÈRES A COUSSINETS PRISMATIQUES

Elles se composent de deux coussinets qui se déplacent dans un porte-filière établi pour assurer leur rapprochement et leur entraînement (fig. 21).

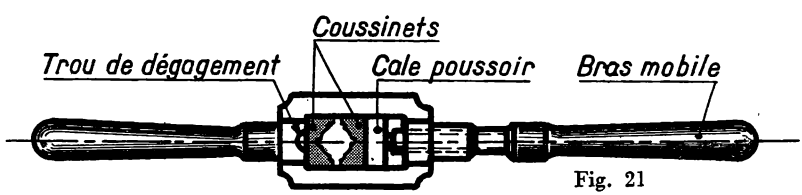


Fig. 21

Les coussinets se font à rainure, à tenon, à épaulement ou en trapèze ; ils sont établis à un diamètre légèrement supérieur au diamètre nominal pour permettre l'exécution du filetage en plusieurs passes:

- effectuer une première passe peu profonde,
- desserrer les coussinets,
- revenir en position de départ et resserrer les coussinets en s'assurant que les dents retombent exactement dans les sillons ébauchés,
- faire une seconde passe,
- exécuter de la même façon d'autres passes si cela est nécessaire.

Ces filières, plus lourdes que les précédentes, conviennent pour le filetage de pièces de gros diamètre.

LES FILIÈRES A PEIGNES

Leurs quatre peignes peuvent être considérés comme quatre portions d'écrou (fig. 22 et 23). Ces peignes sont numérotés et montés en conservant l'ordre de leur établissement, dans une cage qui les rapproche ou les écarte simultanément.

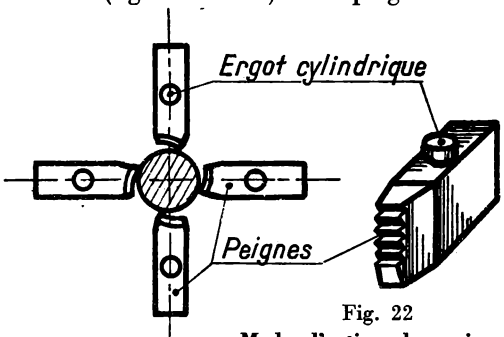


Fig. 22

Mode d'action des peignes dans une filière Dupleix.

Montage radial : les peignes sont placés sur le prolongement de quatre rayons de la section de la tige à fileter. Les ergots s'engagent dans des rainures pratiquées dans une cage qui, par rotation, rapproche ou écarte les peignes.

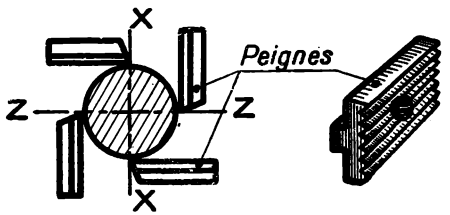


Fig. 23

Mode d'action des peignes dans une filière Unicum.

L'attaque des peignes se fait tangentiellement suivant les axes X et Z.

Le filetage s'exécute en plusieurs passes.

Les peignes étant à filets *dépouillés*, il ne faut pas tourner la filière en sens inverse du sens de travail ; on la dégage après filetage en écartant les peignes.

Un jeu de peignes convient à tous les diamètres de vis ayant le même pas.

REMARQUE. — Les peignes présentent les caractéristiques d'un outil de coupe normal, ils engendrent des filets nets et bien formés. Au contraire, les filières rondes et à coussinets sont à filets sans dépouille, le talonnage qui en résulte produit un frottement important qui peut arracher partiellement le métal.

Le filetage s'exécute également sur le tour et aussi sur des machines à fileter, établies suivant le principe des filières à peignes.

PRATIQUE DU FILETAGE A LA MAIN

La bonne exécution des premiers filets a une grande importance, il faut veiller à maintenir l'axe de la filière dans celui de la tige à fileter.

Pour faciliter le bon départ du filetage, on donne une forme tronconique à l'extrémité de la tige (fig. 24).

Après une pression axiale, nécessaire pour mettre la filière en prise, le filetage s'effectue par simple rotation.

Pour faciliter la coupe et la bonne tenue de l'outil lubrifier comme pour le taraudage.

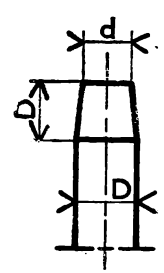


Fig. 24

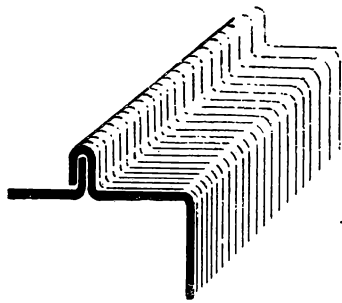


Fig. 1

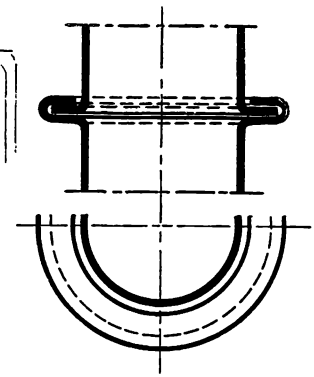


Fig. 2

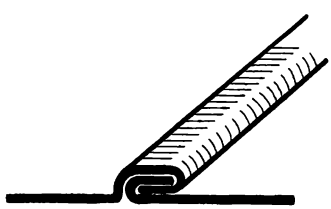


Fig. 3

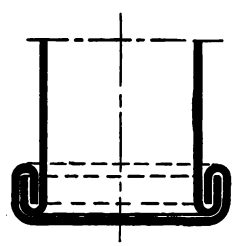


Fig. 4

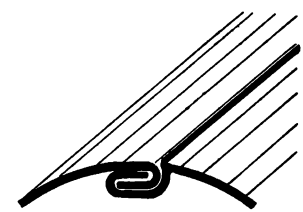


Fig. 5

Fig. 6
Couvre-joint simple

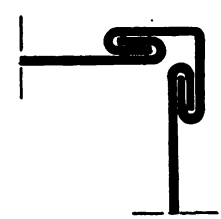


Fig. 7
Couvre-joint d'angle

CHAPITRE IV

L'AGRAFAGE

Ses applications

L'agrafage est employé en fumisterie, en ferblanterie, en petite cuivrerie et sur l'aluminium mince ; il l'est de moins en moins en tôlerie (ventilation).

Il est courant dans les fabrications en série où il est exécuté mécaniquement (ustensiles de ménage, boîtes, etc.).

Il n'offre, généralement, par lui-même aucune garantie d'étanchéité ; celle-ci peut être assurée par divers procédés :

— par soudure à l'étain du joint des pièces exécutées en fer-blanc, en tôle plombée ou galvanisée ;
— lors de la galvanisation, de l'étamage ou du plombage de la pièce ;
— par interposition de papier entre les plis de l'agrafe (tôle d'acier doux) ;
— en enduisant les pinces de gomme laque ou de vernis (aluminium).

L'agrafage est d'un aspect plus agréable que le rivetage, il est aussi plus rapide et plus facile à rendre étanche.

Il est parfois plus économique que la soudure au chalumeau qui engendre fréquemment des déformations.

LES DIFFÉRENTES AGRAFES

a) **l'agrafe simple** : droite (fig. 1) ou courbe (fig. 2) ;
b) **l'agrafe repliée** : rectiligne (fig. 3) ou curviligne (fig. 4), plus résistante, elle assure une meilleure étanchéité que l'agrafe simple ;
c) **l'agrafe repliée renvoyée** à l'intérieur de la pièce (fig. 5) ;
d) **les couvre-joints coulissants** qui assurent l'agrafage de tôles démontables ou de pièces qui ne peuvent être jointes que sur place (garniture et calorifugeage de chaudières de chauffage central).

Ils sont employés également pour l'assemblage des feuilles de zinc sur les toitures ; ils leur permettent de se dilater sans se déformer (fig. 6 et 7).

DÉTERMINATION ET DÉSIGNATION DU PLI DE L'AGRAFE

La largeur de l'agrafe est fonction de l'épaisseur de la tôle : on ne peut descendre au-dessous d'un minimum pour exécuter les plis, d'autre part, une agrafe trop large est disgracieuse.

Pour faciliter le calcul du développement de l'agrafe et aussi le repérage des plis, nous désignerons l'agrafe par la largeur intérieure p de son pli (fig. 8), nous dirons une agrafe de 3, de 5, etc.

Voici quelques dimensions couramment adoptées :

Épaisseur de la tôle e	0,3	0,5	0,6	0,8	1
Largeur du pli p	2,5 à 3	3 à 3,5	3,5 à 4	5	5 à 6

Agrafage longitudinal replié

DÉVELOPPEMENT ET TRAÇAGE DES PINCES

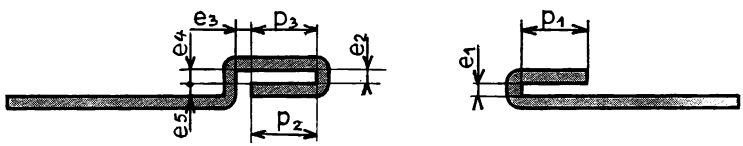


Fig. 8

Fig. 8*a*

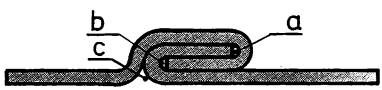


Fig. 8*b*

Si, comme sur la figure 8, on décompose une agrafe repliée en ses différentes parties on trouve que, ***théoriquement***, le métal nécessaire à son exécution est égal à $p_1 + p_2 + p_3 + e_1 + e_2 + e_3 + e_4 + e_5$, soit $3\,p + 5\,e$.

En réalité, on n'obtient pas une agrafe exactement conforme à celle des figures 8 et 8*a*. Il existe toujours un jeu plus ou moins important entre les surfaces en contact, notamment tout le long des bords *a*, *b*, *c* (fig. 8 *b*).

Le développement exact d'une agrafe est donné par la formule empirique

$$\boxed{L = 3\,p + 2\,e}$$

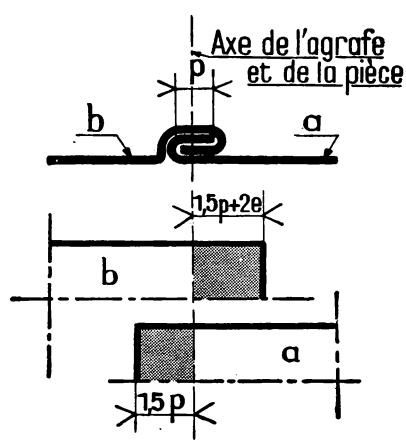


Fig. 8c

Si l'on veut que l'axe de l'agrafe soit exactement sur le plan de symétrie de la pièce (fig. 10), il faut porter du côté *a* (fig. 8 *c*) 1,5 p (1) et du côté *b* 1,5 $p + 2\,e$(2).

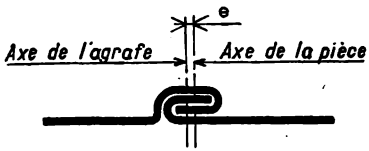


Fig. 9

Mais au lieu de répartir le métal selon les valeurs (1) et (2), on se contente pratiquement d'ajouter le métal en parties égales de chaque côté du développement, ce qui n'entraîne qu'un léger décalage de l'axe de l'agrafe par rapport à l'axe de la pièce (fig. 9).

REMARQUE. — Il faut veiller particulièrement à cette bonne répartition du métal pour l'agrafage des pièces prismatiques comportant des accessoires, notamment des poignées (fig. 10), ou pour

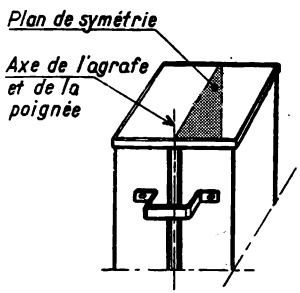


Fig. 10

L'axe de la poignée et l'axe de l'agrafe passent par le plan de symétrie de la pièce.

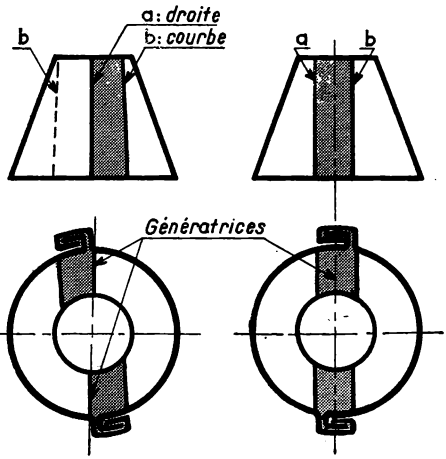


Fig. 11 Fig. 12

l'agrafage des pièces tronconiques. En effet, dans ce dernier cas, si l'on portait, par exemple, $p + e$ d'un côté du développement et $2\,p + e$ de l'autre côté, l'agrafe se trouverait déportée entièrement d'un côté de la génératrice *a*, formant joint (fig. 11). Cette génératrice est une droite, alors que le bord *b* devient une courbe d'autant plus accentuée et disgracieuse que la conicité est plus grande; au contraire, si l'axe de l'agrafe correspond à une génératrice, l'agrafe est également déportée de chaque côté de celle-ci et les bords *a* et *b* se rapprochent de la ligne droite (fig. 12).

RÉALISATION DE L'AGRAFE (fig. 13)

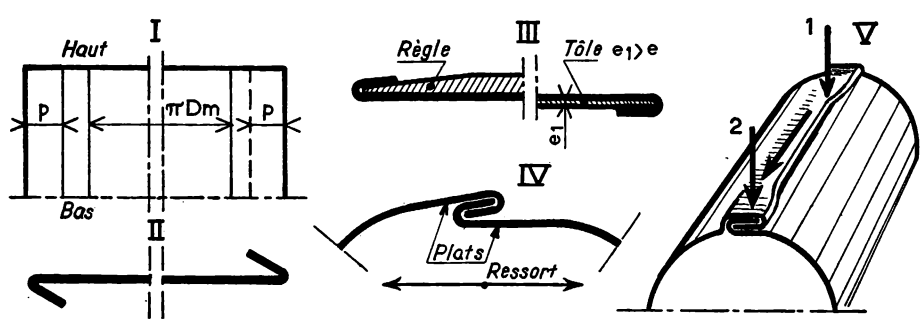


Fig. 13

1° Tracer les plis parallèlement aux bords, l'un sur une face, l'autre sur la face opposée, ***en tenant compte du sens de l'agrafe*** qui, généralement, est ***à droite*** (fig. 14).

2° Exécuter les plis à la plieuse (chaque fois que cela est possible) en serrant la pince (1).

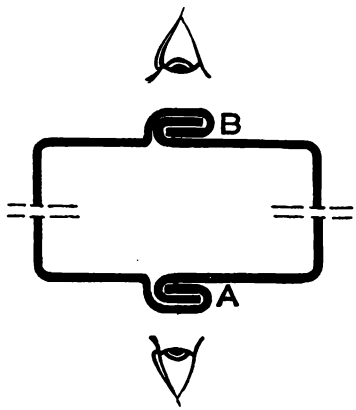


Fig. 14

L'observateur place la pièce devant lui ; il voit l'agrafe A rabattue à droite et l'agrafe B rabattue à gauche.

3° Si l'angle de la pince de pliage montée sur le sommier de la plieuse est trop ouvert, continuer le pliage des pinces en les rabattant sur une cale en tôle ou sur une règle chanfreinée. ***Vérifier la rectitude des pinces.***

4° Former la pièce et emboîter les pinces. Donner du ressort à la pièce afin de maintenir l'agrafe en place. Serrer légèrement l'agrafe en frappant avec un maillet.

REMARQUE. — Pour éviter d'écraser les plis pendant le cintrage on n'amorce pas les extrémités de la tôle. On fait disparaître les plats après agrafage.

5° Serrer l'agrafe, en commençant par les deux extrémités, à l'aide d'un ***chasse-agrafe*** (fig. 15), dont la largeur de la cannelure doit correspondre à celle de l'agrafe.

Si la profondeur de la cannelure est égale à 3 *e*, l'agrafe est terminée, si elle est supérieure, on accentue le serrage en frappant avec un maillet ou avec un marteau postillon.

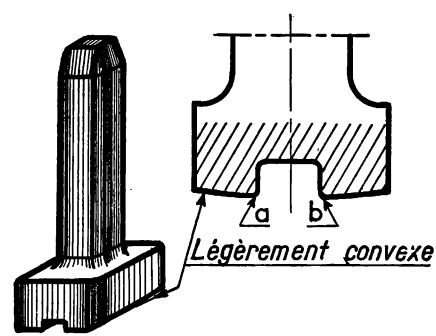


Fig. 15

Les arêtes a et b sont arrondies et la surface est convexe pour éviter de marquer la tôle.

CAUSES DE MALFAÇONS

Les figures 16 à 19 montrent les principaux défauts de préparation qui rendent l'agrafage difficile ou impossible.

(1) Voir chapitre pliage, tome I.

L'emploi d'un chasse-agrafe à cannelure mal dimensionnée est également la cause d'un travail défectueux (fig. 20 à 22).

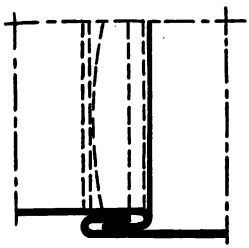


Fig. 16

Tôle mal cisaillée

Les plis sont de largeur inégale.
Les agrafes s'emboîtent mal.
Obligation d'utiliser un chasse-agrafe à large cannelure d'où agrafage disgracieux et peu solide.

Fig. 17

Plis insuffisamment fermés - Serrage difficile, le chasse-agrafe marque la tôle.

Fig. 18

Plis écrasés - Emboîtage impossible.

Fig. 19

Plis inégaux - Agrafe peu résistante.

Fig. 20

Cannelure légèrement étroite.

Fig. 21

Cannelure très étroite.

Fig. 22

Cannelure trop large.

Agrafage de fonds

La dimension des agrafes par rapport à l'épaisseur de la tôle s'établit comme pour l'agrafage longitudinal.

1 — FONDS POLYGONAUX

a) **Agrafe simple** (fig. 23). La figure 24 montre l'avantage du jeu entre le corps et le fond.

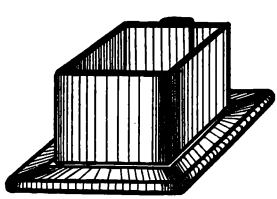


Fig. 23

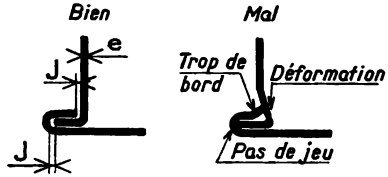


Fig. 24

Développement. 1° A la hauteur du corps ajouter une pince égale au pli de l'agrafe (fig. 27).

2° Tracer un fond dont les dimensions intérieures sont les cotes $C\,1$ du prisme augmentées de $2\,e$ (jeu) et ajouter une pince de largeur P sur chaque côté; couper les angles à 45 degrés (fig. 25 et 26).

REMARQUE. — On ajoute une pince de largeur P pour être certain de ne pas avoir trop de bord alors que théoriquement on devrait ajouter $P + e$ (fig. 28).

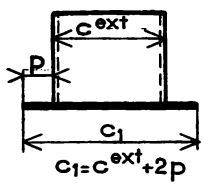


Fig. 25

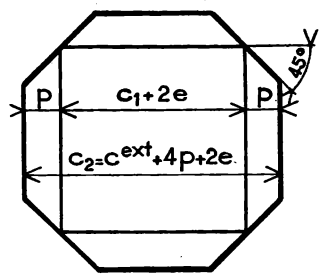


Fig. 26

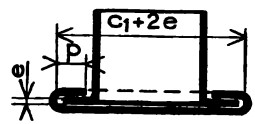


Fig. 28

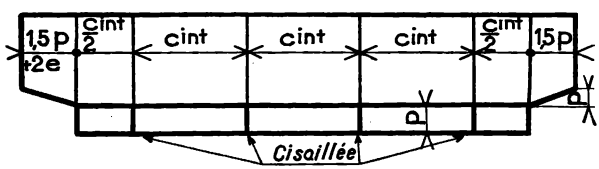


Fig. 27

L'échancrure des pinces sur une hauteur P ne se pratique que lorsque l'agrafe du fond est repliée.

Réalisation. — Préparer le corps comme l'indique la figure 29 :

— plier les bords du fond à 90° ;

— mettre le fond en place et rabattre progressivement les pinces au maillet (fig. 30 à 32), terminer avec le marteau postillon.

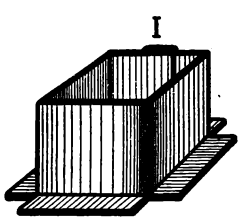


Fig. 29

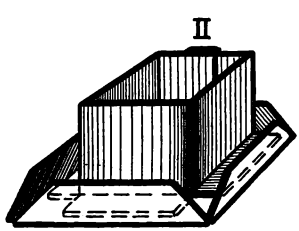


Fig. 30

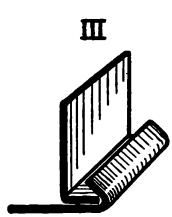


Fig. 31

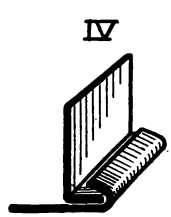


Fig. 32

b) **Agrafe repliée.** Le corps est préparé comme précédemment, le fond comme l'indique la figure 33. On exécute d'abord une agrafe simple, *sans trop la serrer*, que l'on replie ensuite sur un tas plat à *carre vive* (fig. 34).

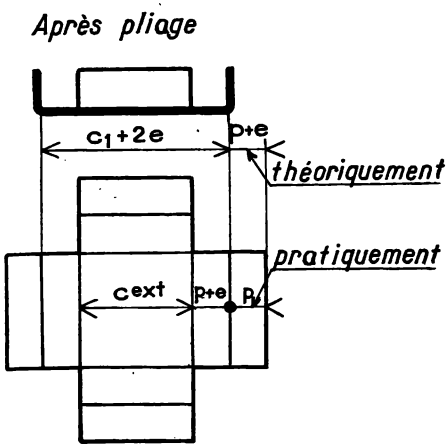


Fig. 33

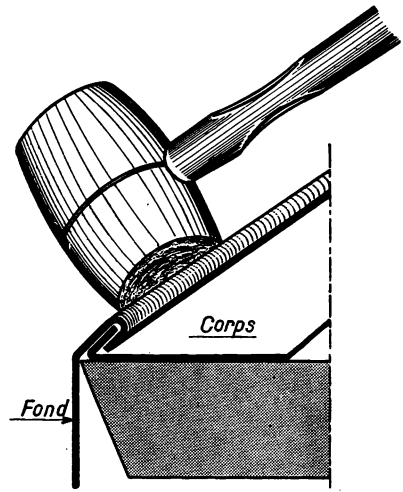


Fig. 34

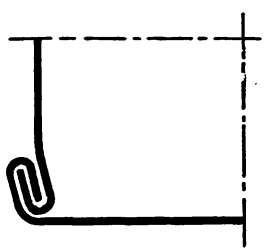


Fig. 35

REMARQUE. — Le jeu *j* (fig. 24) est indispensable pour replier correctement l'agrafe; sans jeu, l'extrémité du bord du fond bute sur le corps et chasse le pli à l'intérieur (fig. 35).

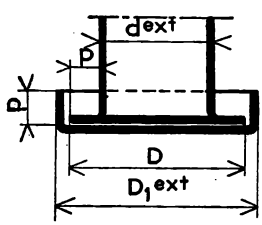


Fig. 36

$D = d^{ext} + 2\,p$

$D_1{}^{ext} = D + 4\,e$

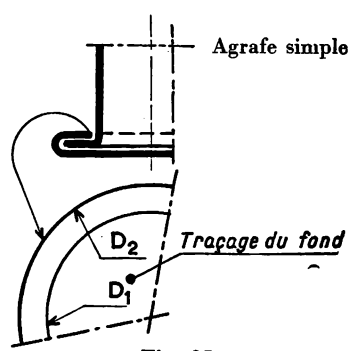


Fig. 37

$D_2 = D_1 + 2\,p = d^{ext} + 4\,p + 4\,e$

pratiquement

$D_2 = d^{ext} + 4\,p + 2\,e.$

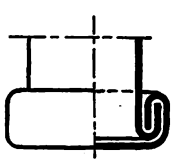


Fig. 38

Agrafe repliée.

2 — FONDS CIRCULAIRES

Le calcul du diamètre du fond est identique à celui du côté des fonds polygonaux (fig. 36 et 37) ; l'agrafage s'exécute de la même façon que pour ceux-ci.

AUTRES FAÇONS D'AGRAFER LES FONDS.

La figure 39 représente un assemblage fréquent et les différentes phases de son exécution. Pour protéger le fond on ajoute souvent un cercle en fer plat (fig. 40).

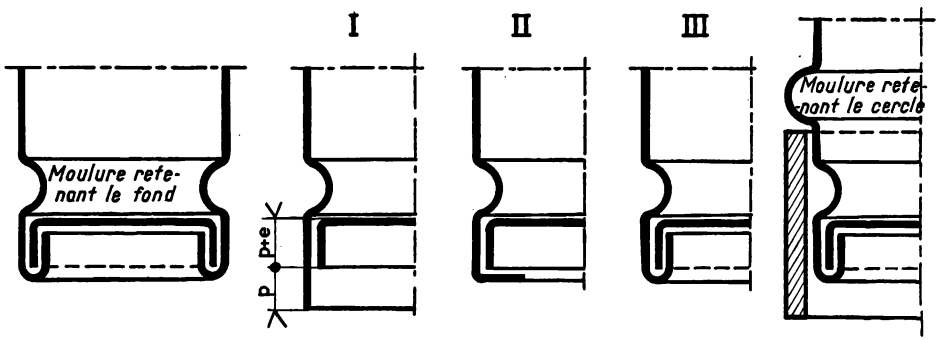


Fig. 39 Fig. 40

Les figures 41 et 42 donnent deux autres dispositions.

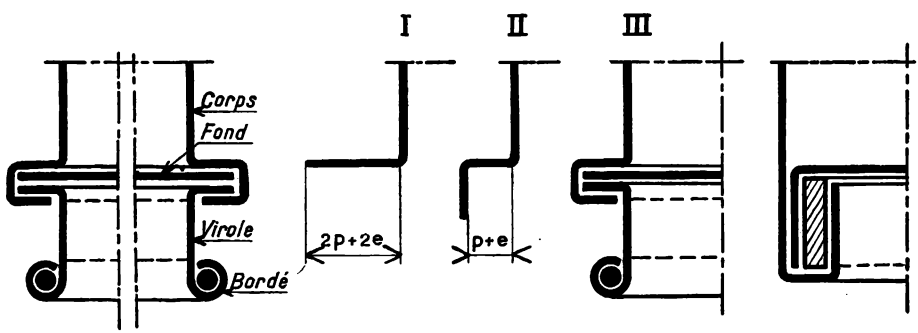


Fig. 41 Fig. 42

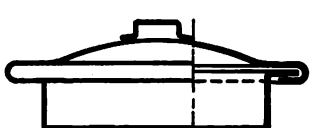


Fig. 43

L'agrafage d'un couvercle à endent est analogue à celui d'un fond.

Agrafage en angle

(fig. 44)

Les figures 46 et 47 donnent le développement (d'après les indications de la figure 45) et la méthode d'exécution de cet agrafage.

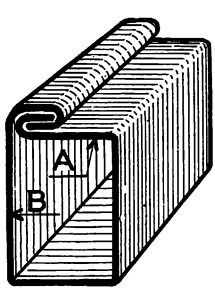


Fig. 44

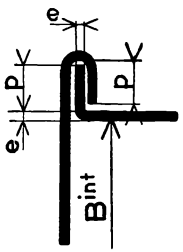


Fig. 45

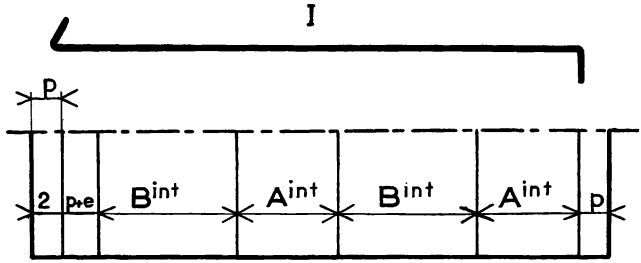


Fig. 46

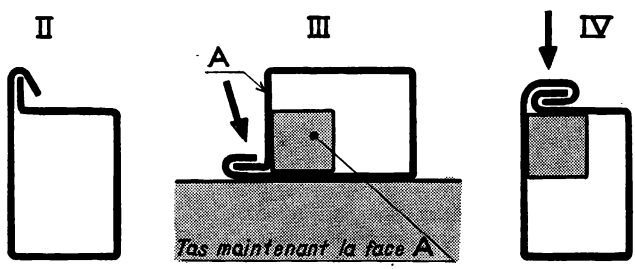


Fig. 47

I Plier les pinces: A à 90°, B à environ 60°.
II Plier les faces.
III Serrer la pince B sur un tas ou sur un marbre à l'aide du maillet et du marteau postillon.
IV Rabattre l'agrafe sur un tas à carre vive (maillet et marteau postillon).

Agrafage transversal

Employé pour assembler des viroles, des éléments de coudes, de flotteurs, etc., il est de plus en plus abandonné en tôle noire et remplacé par le soudage au chalumeau ou le soudage par points, sauf en fumisterie.

L'agrafe est généralement simple (fig. 48 et 50), rarement repliée (fig. 49).

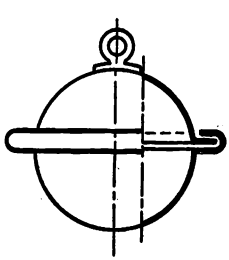


Fig. 48

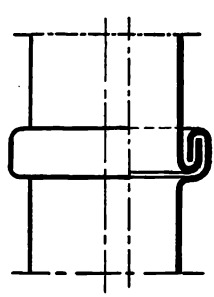


Fig. 49

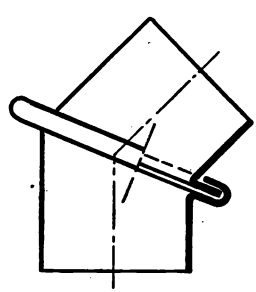


Fig. 50

La méthode d'exécution est schématisée par la figure 51.

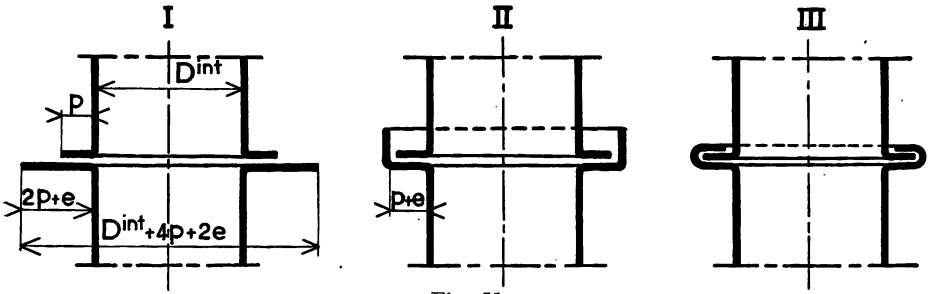


Fig. 51

Agrafe renvoyée à l'intérieur

Préparée comme l'agrafe extérieure, on la serre sur un ***tas à cannelure*** (fig. 52).

Sans utiliser de tas à cannelure, on renvoie fréquemment les agrafes sur quelques centimètres, par exemple pour l'emboîtage de tuyaux (fig. 53) en utilisant un tas carré (fig. 54).

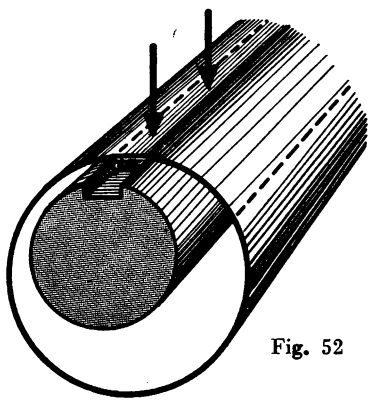


Fig. 52

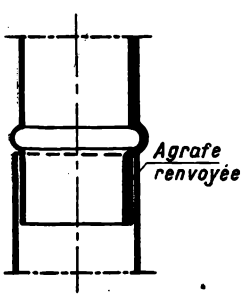


Fig. 53

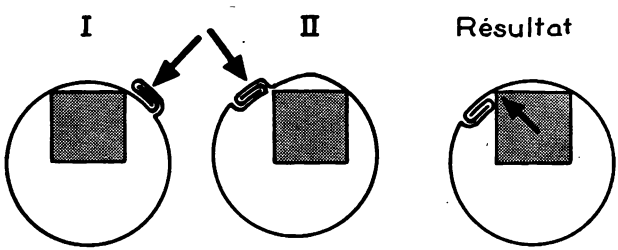


Fig. 54

Machine à serrer les agrafes (fig. 55)

Elle remplace le chasse-agrafe ou le tas à cannelure. L'agrafe, placée sur un *mandrin*, est serrée par la pression d'une *molette mobile*. Le mandrin est orientable dans le bâti afin de présenter ou non sa cannelure sous la molette.

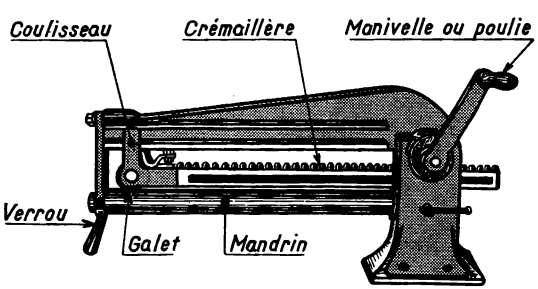


Fig. 55

On utilise la cannelure et une molette lisse pour les agrafes intérieures ; une molette rainurée pour les agrafes extérieures (fig. 56 et 57).

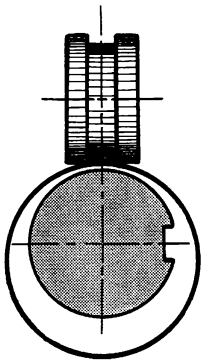


Fig. 56

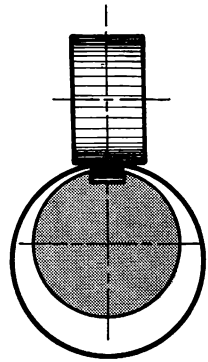


Fig. 57

Exécution des bords tombés et des bords rétreints

L'agrafage des fonds circulaires, des viroles, des éléments de coudes, etc., nécessite la façon de *bords tombés* et de *bords rétreints* de petites largeurs (3 à 12 *mm*).

LES BORDS TOMBÉS

La figure 58 montre que le périmètre du bord extérieur de la pièce est plus grand après exécution qu'avant: $\pi D > \pi d$. Pour obtenir un bord tombé il faut donc ***allonger la pince en la martelant à coups portants.*** On utilise la panne d'un *marteau à garnir* et un *tasseau* ou un tas à arête vive (fig. 59).

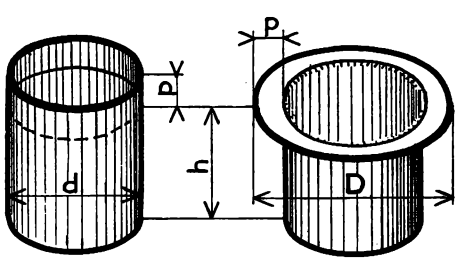


Fig. 58

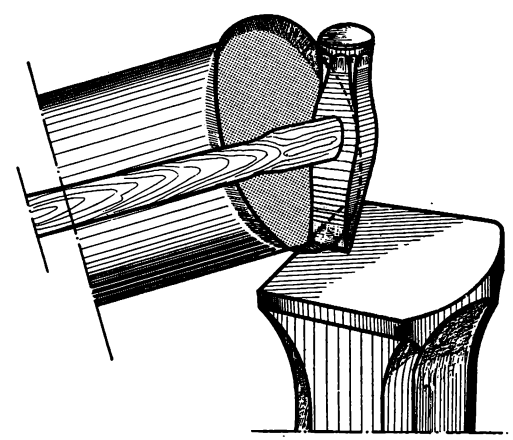


Fig. 59

Il faut allonger le métal régulièrement, par passes successives, en inclinant la pièce de plus en plus à chaque passe (fig. 60). La dernière passe est exécutée avec la tête du marteau à garnir pour effacer les marques laissées par la panne (fig. 61).

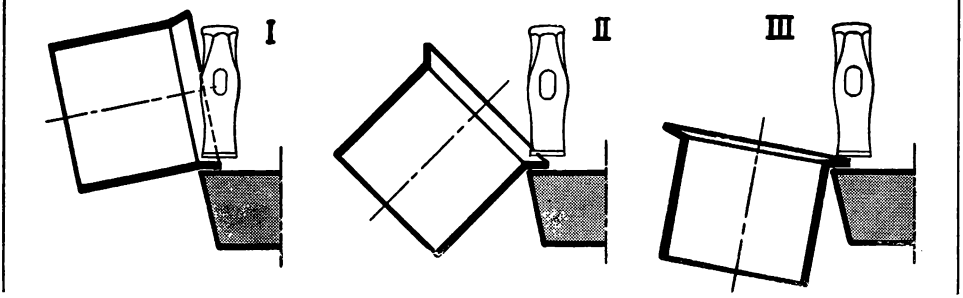


Fig. 60

Marteler d'abord toute la largeur de la pince et ensuite accentuer l'allongement vers le bord.

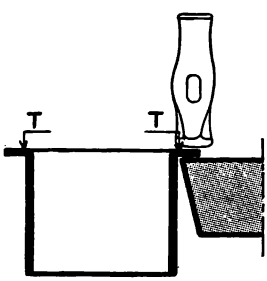


Fig. 61

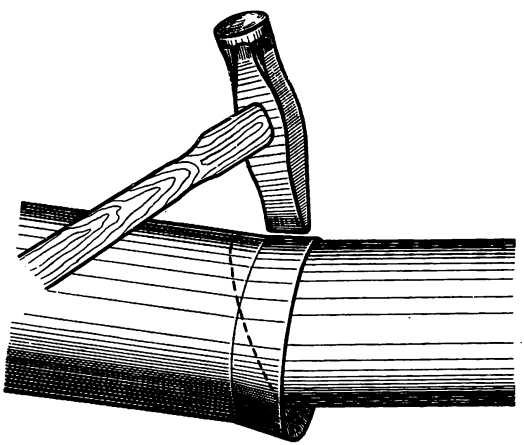


Fig. 62

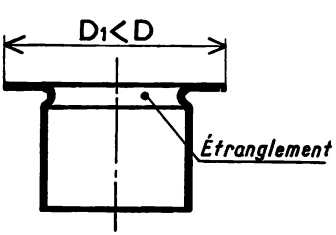


Fig. 63

Si le diamètre de la pièce est trop petit pour permettre un allongement correct de l'intérieur, on commence par allonger la pince de l'extérieur sur une bigorne ronde (fig. 62).

REMARQUES IMPORTANTES. — Il ne faut pas incliner la pièce trop rapidement, le « *coup* » ne porterait pas, l'allongement serait insuffisant et *le bord s'étranglerait* (fig. 63).

— Pour réaliser une pièce de hauteur *h* et de pince *p* aux cotes demandées, il faut que pendant tout le martelage le trait *T* repose sur le tas (fig. 64 et 65).

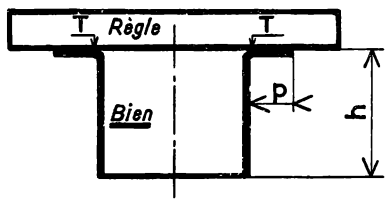


Fig. 64

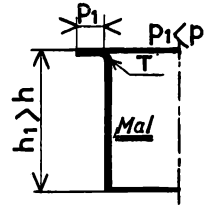


Fig. 65

LES BORDS RÉTREINTS

Les bords d'agrafe sont toujours étroits (3 à 6 *mm*), ce qui facilite le travail (1).

Pour rétreindre un bord il faut réduire son périmètre extérieur (fig. 66), il faut donc ***frapper à faux,*** de préférence avec un maillet.

Les pièces de petit diamètre (jusqu'à 200 ou 250 *mm*) sont rétreintes sur un ***bordoir*** (fig. 67). Les pièces de

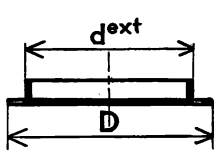


Fig. 66

π d < π D

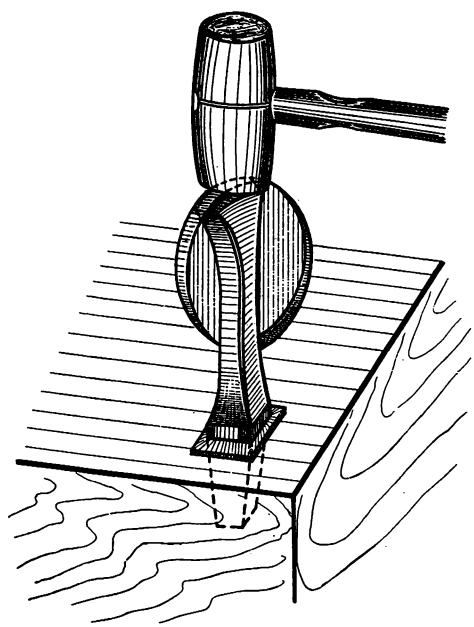


Fig. 67

(1) Un chapitre du tome III étudie la rétreinte, opération de formage de pièces importantes.

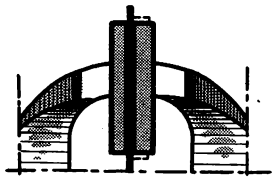


Fig. 68

diamètre plus grand sont rétreintes sur des tas ronds ou à la ***moleteuse*** (voir chapitre: travail à la moleteuse). On peut également serrer le fond entre deux rondelles tournées au diamètre intérieur et rabattre le bord au maillet (fig. 68).

Le tracé est fait sur la face extérieure afin qu'il soit visible pendant le travail.

Pour obtenir une pièce aux cotes désirées, le trait doit toujours être sur le tas ou le bordoir (fig. 69).

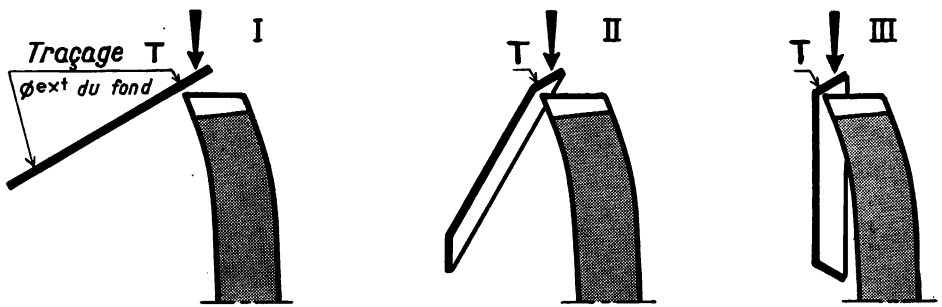


Fig. 69

La pince ne porte pas sur le tas, le **coup est « porté à faux ».**

Pendant la rétreinte, le fond ne reste pas plan, il faut le redresser à chaque passe en frappant d'aplomb sur le bord (fig. 70 et 71).

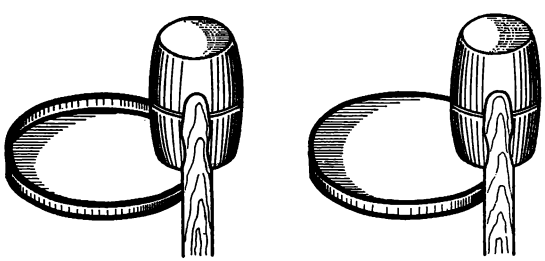


Fig. 70

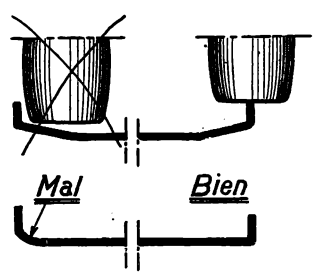


Fig. 71

CHAPITRE V

LE RIVETAGE DES TÔLES D'ACIER

Les rivets

FORME ET DÉSIGNATION DES RIVETS EN ACIER.

On emploie des rivets en acier doux et extra-doux ($d < 10$ *mm*), fabriqués en partant de tiges cylindriques dont une extrémité a été refoulée pour former la tête, dite *tête de pose.*

La forme de la tête détermine le nom du rivet.

Les têtes sont normalisées (C.N.M. 26) ***et désignées par un symbole.***

Emploi : Les rivets à *tête plate* (fig. 1) ne sont employés qu'en petite tôlerie ($d \leqslant 10$ *mm*).

Les *têtes rondes* (fig. 2, 3, 4) sont les plus résistantes et les plus couramment employées en chaudronnerie ; les têtes *R a* et *R b* sont réservées à la grosse construction et aux chaudières.

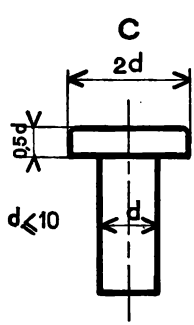


Fig. 1

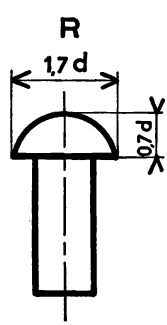


Fig. 2

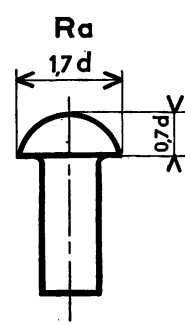


Fig. 3

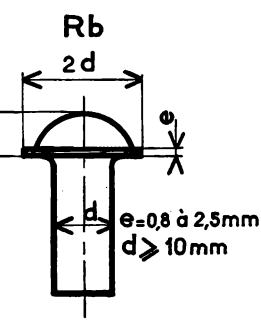


Fig. 4

Les rivets à *tête goutte de suif* (fig. 5) sont d'un emploi exceptionnel, ils assurent néanmoins l'étanchéité quand $d > 4$ *mm*.

Les rivets à *tête fraisée* (fig. 6 et 7) sont employés lorsque la tôle ne doit présenter aucune *surépaisseur*.

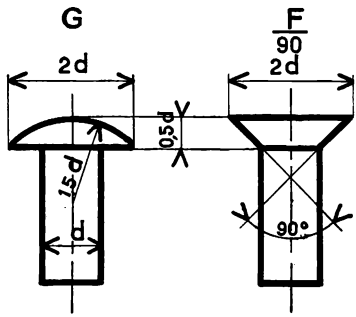


Fig. 5

Fig. 6

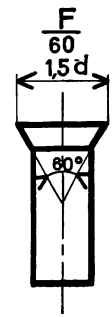


Fig. 7

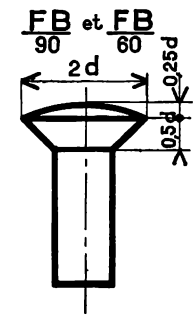


Fig. 8

Quand une légère surépaisseur est tolérée, on fait usage de rivets à *tête fraisée - bombée* (fig. 8) plus résistants que les précédents (large emploi en construction navale).

Désignation. Trois éléments interviennent dans la désignation des rivets:

— la forme de la tête,

— le diamètre du *corps* (nommé également *tige*, ou *fût*),

— la longueur prise sous tête, sauf pour les rivets *F* et *F b* (fig. 9, 10, 11).

Exemple: rivet R 8.22.

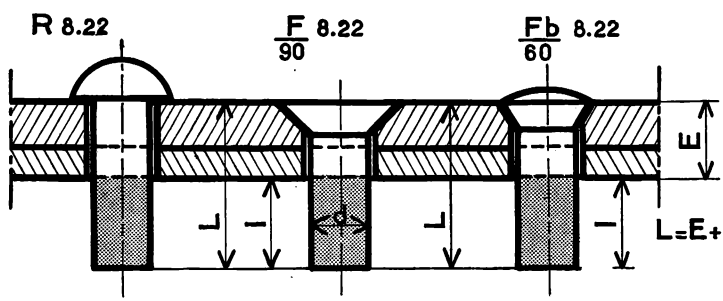


Fig. 9 Fig. 10 Fig. 11

Quelle que soit la forme de la tête, la longueur *L* du rivet est égale à l'épaisseur à river, augmentée de la longueur *l* nécessaire à l'exécution de la seconde tête.

REPRÉSENTATION SYMBOLIQUE DES RIVETS SUR LES DESSINS

Pour les rivets les plus usuels, notamment en charpente métallique, on applique les normes représentées fig. 12.

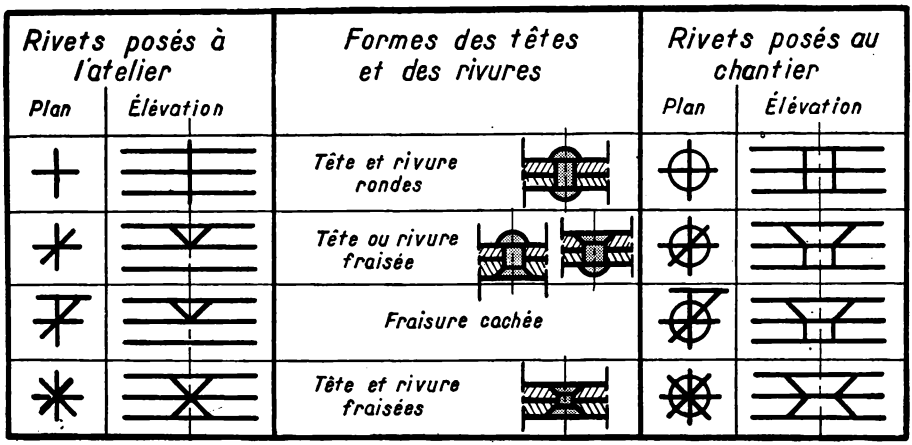


Fig. 12

En tôlerie-chaudronnerie, la grande variété des formes et des diamètres des rivets ne permet pas de se limiter aux signes normalisés ci-dessus. On choisit pour chaque type de rivet un signe aussi simple que possible qui est expliqué par une légende ; on indique également la forme des têtes façonnées.

Pour une série de rivets équidistants, on ne représente que leur ligne d'axe commune et les deux rivets extrêmes en marquant d'un simple trait normal à la ligne d'axe la position du deuxième et de l'avant-dernier rivet (fig. 13).

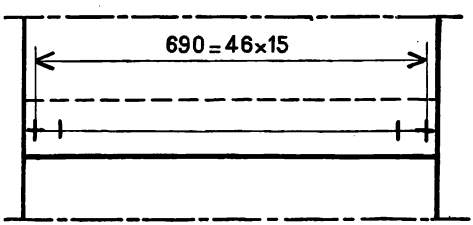


Fig. 13

Le premier nombre: 46 désigne l'entraxe.
Le second nombre: 15 désigne le nombre d'intervalles.

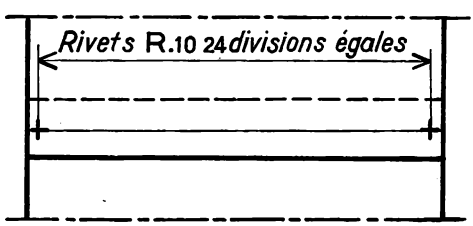


Fig. 14

Fréquemment, on se contente d'indiquer le nombre de divisions égales ou l'écartement moyen (fig. 14).

REMARQUE. — En tôlerie et en petite chaudronnerie, le choix et le nombre des rivets sont souvent laissés à l'initiative du traceur.

Les rivures

L'assemblage réalisé par rivets est nommé *rivure*, ou parfois, *clouure*.

Les rivures les plus courantes sont :

a) à recouvrement ou à clin simple (fig. 15),
b) à clin épaulé (fig. 16),
c) à franc bord avec simple couvre-joint (fig. 17),
d) à franc bord avec double couvre-joint (fig. 18).

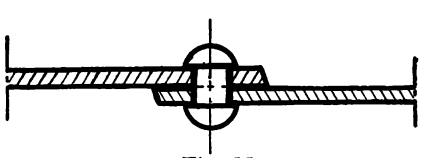


Fig. 15

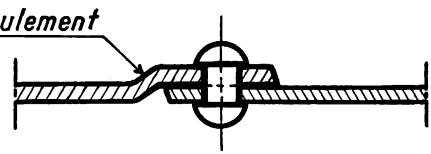


Fig. 16

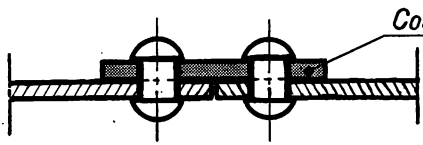


Fig 17

Rivures simples.

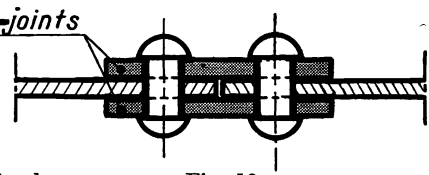


Fig. 18

Ces rivures peuvent être:

simples: une seule ligne de rivets pour les rivures à clin et deux lignes pour les rivures à couvre-joint,

ou ***doubles:*** deux lignes de rivets pour les rivures à clin et quatre lignes pour les rivures à couvre-joint (fig. 19, 20, 21).

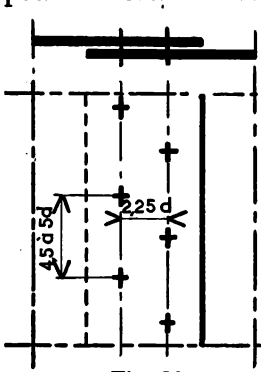


Fig. 19
Rivetage en quinconce.

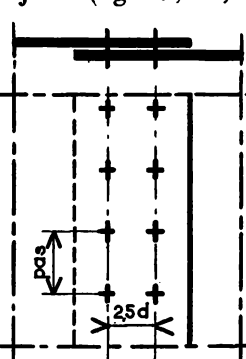


Fig. 20
Rivetage en chaîne.

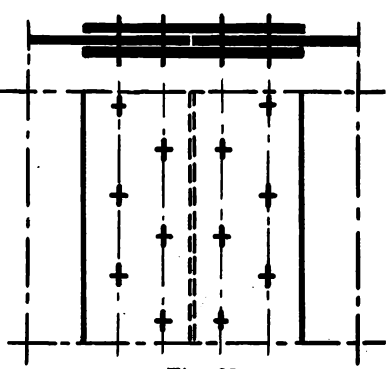


Fig. 21

La double rivure se fait en quinconce ou en chaîne. Le rivetage en quinconce est un peu plus léger, le joint est moins large. Le tracé du rivetage en chaîne est plus simple, il est très employé en construction navale.

Les rivures doubles, plus résistantes que les rivures simples, sont adoptées pour l'assemblage de pièces devant résister à des pressions $\geqslant$ 6 bars.

PRÉPARATION DU RIVETAGE

1 — CHOIX DU RIVET

a) **sa forme** est fonction de la résistance requise et de son emplacement ;

b) **son diamètre** est sensiblement égal à l'épaisseur à river pour les épaisseurs de tôle comprises entre 2 et 8 millimètres.

Pour les épaisseurs de tôle comprises entre 10 et 16 *mm*, on prend $d = e + 6$ ou $e + 7$.

Au-dessus de 16 *mm*, le diamètre du rivet ne croît que lentement. Le tableau ci-dessous donne les diamètres de rivets couramment employés en construction navale.

Épaisseur de la tôle.....	1	2	3	4	5	6	7	8
Diamètre du rivet.....	3-4	4-5	6-8	8-10	10-12	10-12	12-14	14-16
Épaisseur de la tôle.....	10	12	14	16	18	20	22	25
Diamètre du rivet.....	16-18	18-20	20-22	22-24	24	24	24	26

La formule de *Hambourg* : $d = \dfrac{45\,e}{15 + e}$

et la formule de *Breuil* : $d = (\sqrt{50e}) - 4$

donnent sensiblement les mêmes résultats.

c) **Sa longueur** est égale à l'épaisseur E des pièces à assembler, augmentée de la longueur nécessaire à la formation de la rivure et aussi au remplissage du trou par refoulement du fût (fig. 22) ; cette dernière longueur varie d'une part avec l'épaisseur à river et, d'autre part, avec le jeu entre le trou et le rivet. Les formules qui suivent ne sont donc

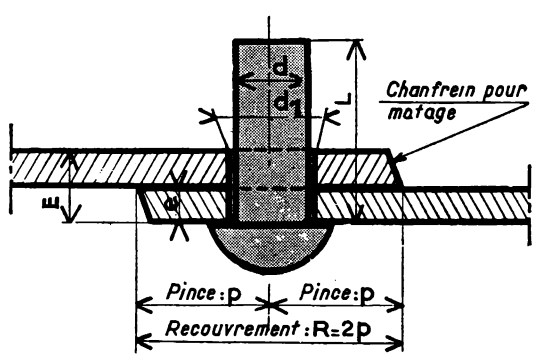


Fig. 22

qu'approximatives, seule l'expérience permet de déterminer avec exactitude la longueur du rivet.

Plus la pression exercée sur le rivet est grande, plus le refoulement du fût est important, et plus il faut ajouter de métal, d'où les différentes valeurs de L données ci-dessous pour une rivure ronde:

$L = E + 1{,}5\ d$ pour un rivetage au marteau à main,
$= E + 1{,}6\ d$ » » » » » pneumatique,
$= E + 1{,}7\ d$ » » » à la presse hydraulique.

Pour une rivure fraisée-bombée:

$$L = E + 1{,}2\ d \text{ environ.}$$

Pour une rivure fraisée plate:

$$L = E + 0{,}7 \text{ à } 0{,}8\ d.$$

2 — LA PINCE

On appelle pince la distance de la ligne de rivure au bord de la tôle.

Une pince trop étroite pourrait s'écraser pendant le rivetage ou se fendre au droit du trou. Une pince trop large laisserait bâiller la tôle et ne pourrait être matée.

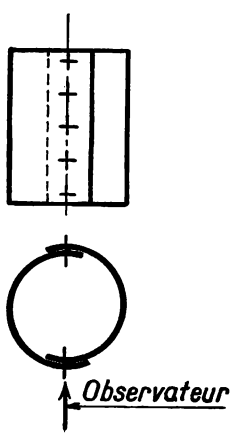


Fig. 23

La largeur des pinces est comprise entre 1,5 d et 2 d.

En construction navale, on prend:

1,5 d + 2 *mm* pour les pinces non chanfreinées et

1,5 d + 2 *mm* + 0,4 e pour les pinces chanfreinées.

Pour faciliter le matage, les pinces sont toujours prévues « *à droite* » (fig. 23).

Étirage des pinces : Lorsqu'un assemblage rivé comporte plus de deux épaisseurs, il faut étirer la pince qui se trouve entre deux tôles pour éviter la formation d'un vide (fig. 24 et 25) ; si l'épaisseur de la tôle le permet, on étire la pince suffisamment pour qu'elle puisse être prise par le rivet suivant.

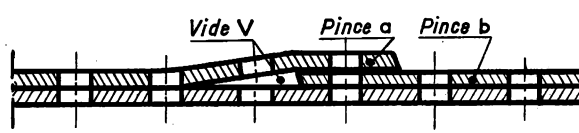


Fig. 24

Si la pince b n'est pas étirée, il se produit un vide V.

La pince doit diminuer régulièrement d'épaisseur et ne présenter aucun défaut de surface si l'on veut que la rivure soit étanche.

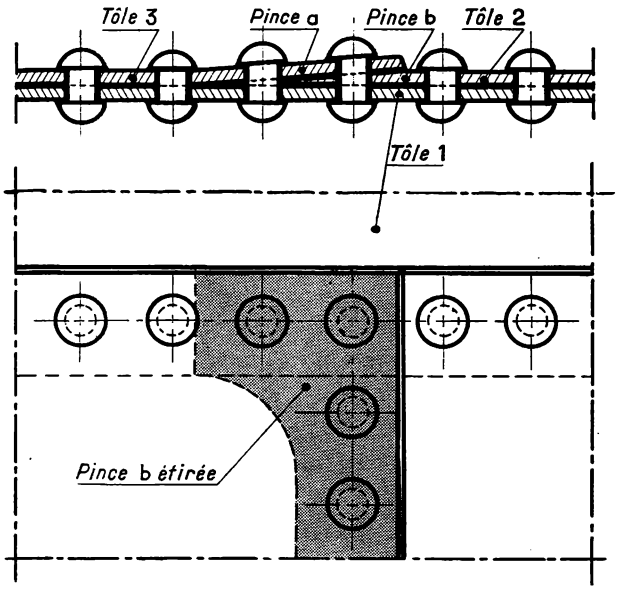


Fig. 25

L'étirage est fait à froid ($e < 3$ *mm*) ou à chaud, soit au marteau à main (fig. 26), soit à la masse ou au dégorgeoir (terminer à la chasse à parer pour faire disparaître les marques).

Quand les pinces des tôles épaisses sont très larges (double rivure), elles sont parfois rabotées au lieu d'être étirées. Dans certains cas, on comble le vide en rapportant une cale de section triangulaire.

REMARQUE. — Pour assurer un rivetage étanche, il faut que les surfaces des pinces qui seront en contact soient bien propres et, notamment, exemptes de corps gras qui empêcheraient le contact intime des deux pinces.

3 — LE PAS

On appelle «pas» la distance entre axes de deux rivets consécutifs d'une même file. Il varie avec le degré d'étanchéité à obtenir, mais il n'est jamais inférieur à 2,25 *d*, afin de ménager la résistance de la tôle entre les trous et aussi pour permettre le rivetage et le matage.

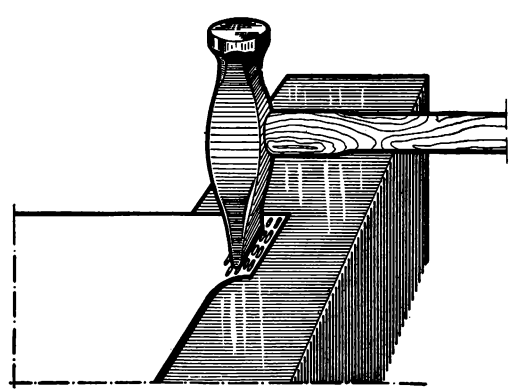


Fig. 26

On adopte généralement pour :

Fumisterie, tôlerie ..... p :	jusqu'à 20 d.
Rivures non étanches	8 à 10 d.
Rivures étanches à l'eau sans autre pression intérieure....	3,5 à 4 d.
Rivures étanches à l'eau à une pression inférieure à 6 *bars* ..	3 d.
Rivures étanches à de fortes pressions (chaudières), ou à l'essence, au pétrole, à l'alcool	2,5 d et 2,25 d.

4 — PERÇAGES DES TÔLES

Il est réalisé à un diamètre $d\,1$ supérieur à celui d des rivets, pour que ceux-ci entrent librement, mais le jeu ($d\,1 - d$) doit être réduit au minimum (fig. 22) :

$d\,1 = d + 0{,}2$ *mm* jusqu'à $d = 5$ *mm*,
$= d + 0{,}3$ à $0{,}5$ *mm* pour $d = 6$ à 8 *mm*,
$= d + 0{,}7$ à 1 *mm* pour $d = 10$ à 16 *mm*,
$= d + 1$ à $1{,}5$ *mm* pour $d > 16$ *mm*.

En tôlerie courante, les tôles sont poinçonnées ; pour les travaux étanches, elles sont percées au foret (voir tome 1).

5 — ASSEMBLAGE AVANT RIVETAGE

Quand les pinces à river sont en position, il faut les ***accoster,*** c'est-à-dire les maintenir serrées l'une contre l'autre.

L'accostage des tôles minces peut se faire en mettant des rivets de place en place.

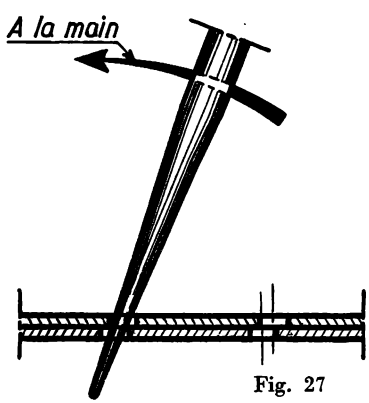


Fig. 27
Pour les tôles minces.

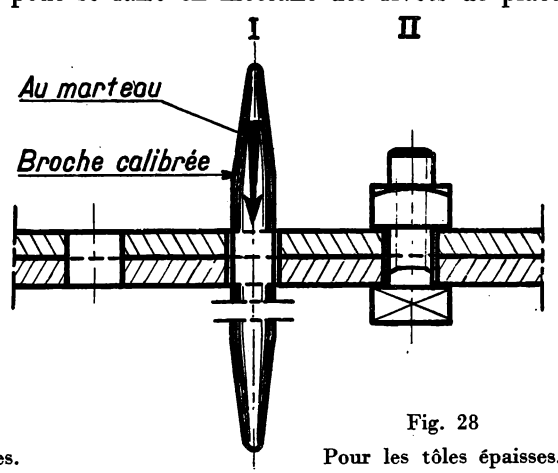


Fig. 28
Pour les tôles épaisses.

Ordinairement, on utilise des boulons de montage, serrés fortement pour éviter tout glissement des tôles.

Avant de poser les boulons, il faut que les trous d'assemblage coïncident parfaitement. Si les pinces sont déportées l'une par rapport à l'autre, on les fait glisser à l'aide d'une broche (fig. 27, 28).

Les pinces épaisses sont serrées facilement et rapidement avec un ***vérin d'accostage,*** vérin hydraulique mis en place par introduction de la tige, après enlèvement de l'écrou (fig. 29).

Une fois les pinces accostées, la concordance des trous est vérifiée à l'aide d'un rivet introduit dans chacun d'eux; on marque à la craie ceux qui doivent être rectifiés ***(ragréés).***

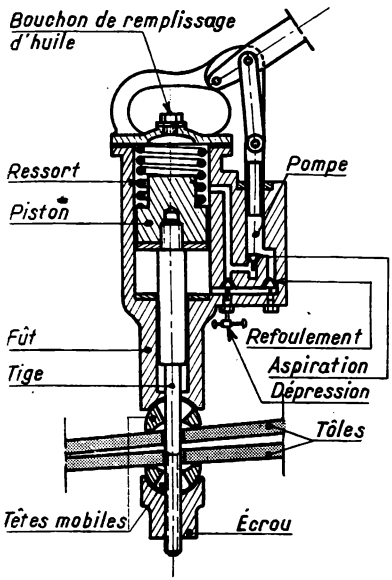


Fig. 29

Fig 30

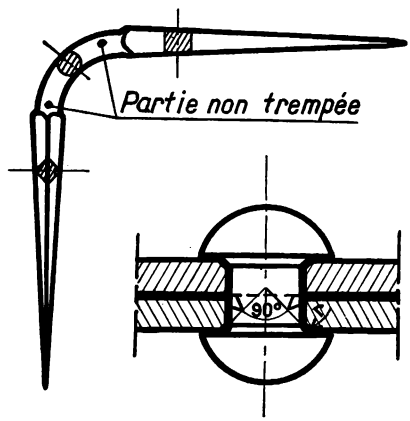


Fig. 31

Les tôles minces ($e < 2$ *mm*) sont ragréées avec un ***équarrissoir*** (fig. 30), les tôles plus épaisses avec un ***alésoir*** (voir chapitre perçage, tome I).

Pour les travaux soignés, il est préférable de faire un perçage de montage à un diamètre inférieur à celui du rivetage et d'aléser ensuite tous les trous après accostage.

Pour la pose de rivets *R a* il faut fraiser légèrement la tôle recevant la tête afin que le congé *r* ne soit pas un obstacle à l'adhérence de la tête sur la tôle (fig. 31).

REMARQUE. — Dans tous les cas, il est recommandé de fraiser légèrement les trous pour supprimer les bavures et détruire l'arête vive circulaire qui crée une section de rupture entre le corps et les têtes du rivet.

LA PRATIQUE DU RIVETAGE

Quels que soient la grosseur du rivet et le mode de rivetage, il est indispensable que la tête du rivet soit énergiquement soutenue. On utilise des *tas* de formes variées dont la masse doit être suffisante pour s'opposer au recul du rivet sous l'effort de rivetage.

Les tas à river sont généralement en acier doux ou demi-dur ; on amorce l'*empreinte* qui recevra la tête du rivet avec un foret, on la termine à chaud en frappant sur un rivet (fig. 32). La profondeur de l'empreinte doit être moindre que la hauteur de la tête du rivet (fig. 33).

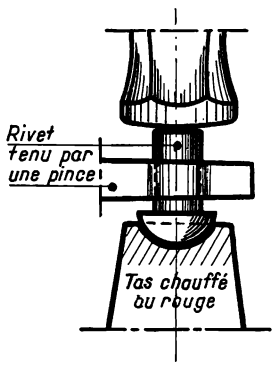


Fig. 32

Les figures 34 à 38 montrent les principaux tas à river utilisés en tôlerie-chaudronnerie; le tas (fig. 37) peut être tenu directement à la main par un aide nommé *teneur de tas* ou par l'intermédiaire d'un levier : c'est *tenir l'abatage.*

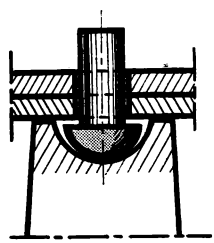


Fig. 33
Empreinte trop profonde. La tête du rivet ne porte pas. Le tas marque la tôle.

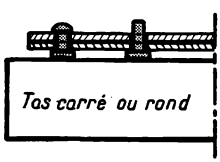


Fig. 34

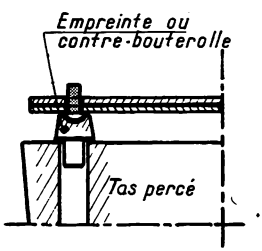


Fig. 35

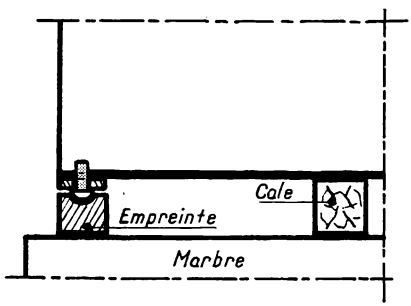


Fig. 36

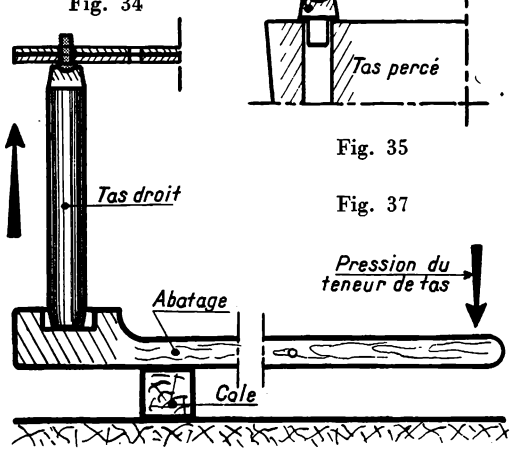


Fig. 37

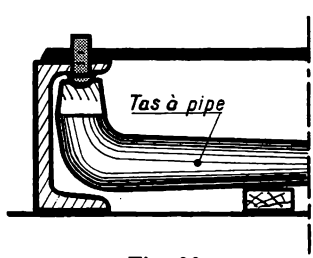


Fig. 38

Un homme seul peut river des fers plats ou des cornières en ceinture à l'extrémité d'un récipient en employant un tas à crochet (fig. 39 et 40), une légère traction sur le crochet suffit à maintenir le tas en place.

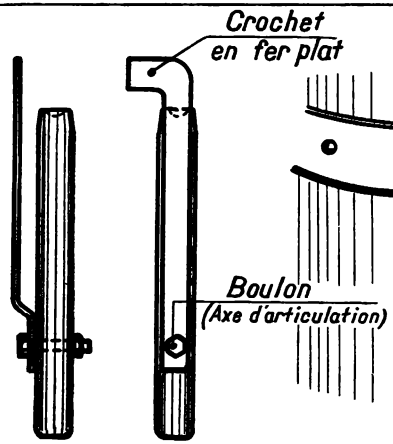


Fig. 39

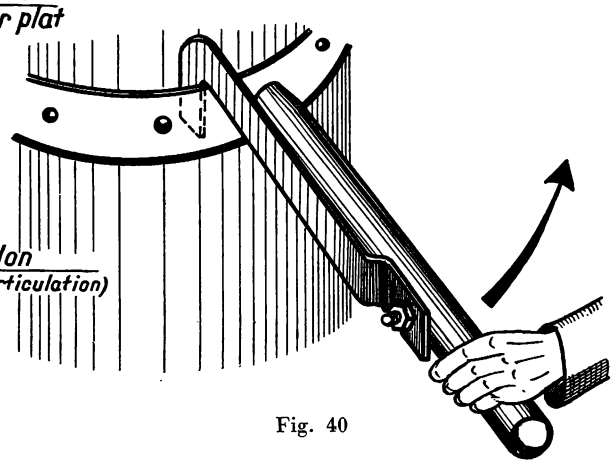


Fig. 40

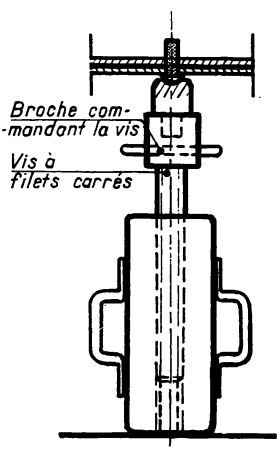


Fig. 41

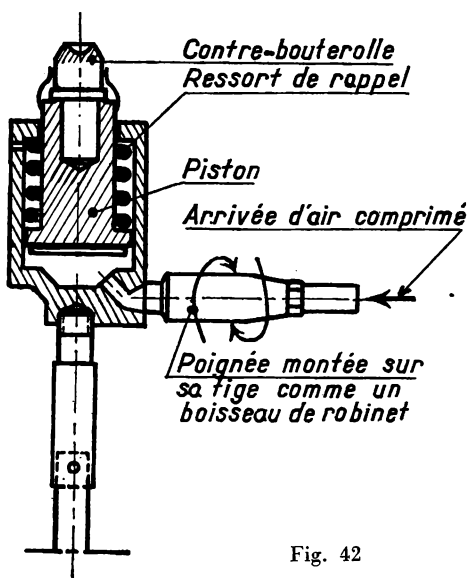


Fig. 42

En chaudronnerie, on emploie également un tas fixé sur un vérin à vis nommé *turc* (fig. 41).

Le *tas pneumatique* (fig. 42) sert surtout pour le rivetage au marteau pneumatique.

1 — LE RIVETAGE AU MARTEAU A MAIN

Il ne s'effectue ordinairement que pour la pose à froid de rivets n'excédant pas huit millimètres de diamètre.

Afin que la tête du rivet « *porte bien* », on frappe sur un outil nommé indifféremment: ***tire-rivet, appelle-rivet*** ou ***chasse-rivet,*** dans lequel le rivet est engagé (fig. 43-45).

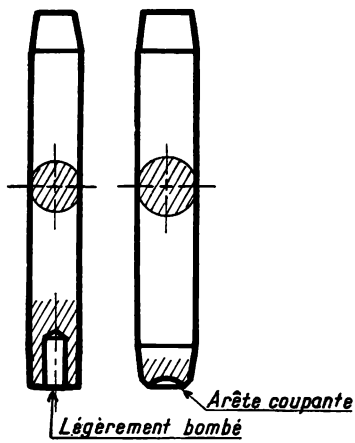


Fig. 43
Tire-rivet et bouterolle

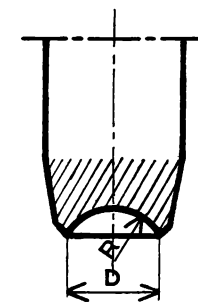


Fig. 44

On écrase le rivet en frappant d'abord d'aplomb pour refouler le fût qui doit remplir le trou (fig. 46) ; on incline ensuite le marteau pour amorcer la tête concentriquement à l'axe (cas d'une rivure ronde) (fig. 47).

La tête ronde est terminée à l'aide d'une ***bouterolle*** (fig. 44), placée d'abord dans l'axe du rivet, puis inclinée pour obtenir tout autour de la tête une légère bavure que l'on coupe avec l'extrémité de la bouterolle en terminant le travail (fig. 48 et 49).

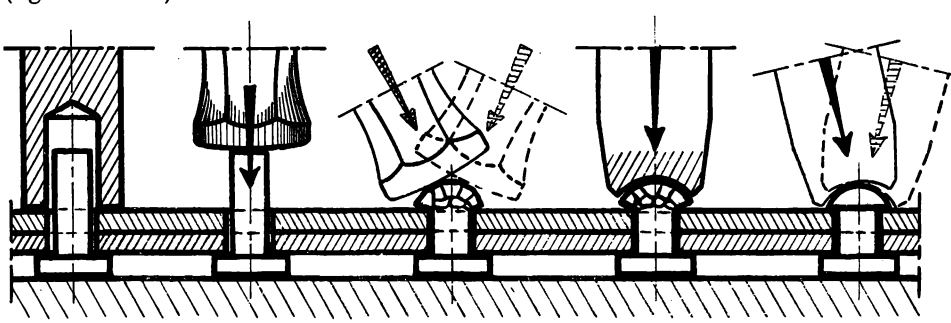


Fig. 45 Fig. 46 Fig. 47 Fig. 48 Fig. 49

RIVETAGE DE PETITE TÔLERIE ET DE FUMISTERIE

C'est surtout la rapidité du travail qui est recherchée. La tête est formée par quelques coups de marteau et arrondie avec une bouterolle non coupante. Les tôliers utilisent un outil formant à la fois tire-rivet et bouterolle (fig. 50).

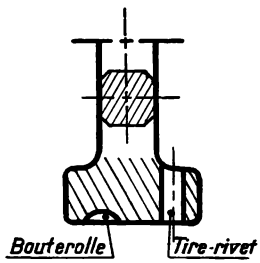


Fig. 50

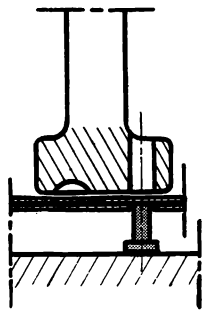
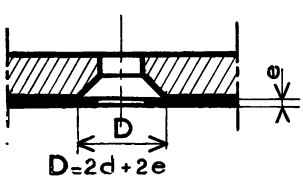


Fig. 51

REMARQUE. — Souvent, seule la pince inférieure est poinçonnée, la pince supérieure est percée par le rivet qui fait office de poinçon en s'engageant dans le tire-rivet, celui-ci remplace la matrice (fig. 51).

Rivure de ceinture de renfort sur tôle mince.



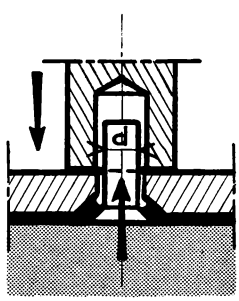


Fig. 52

La tôle est chassée dans la fraisure par le tire-rivet.

Si l'on ne veut aucune saillie à l'intérieur, on emploie des rivets à tête fraisée. La tôle étant trop mince pour loger la tête du rivet dans une fraisure, seul le renfort est fraisé, mais assez profondément pour recevoir à la fois la tête du rivet et la tôle entraînée par celle-ci sous l'action du tire-rivet (fig. 52).

La tête du rivet est dite « abreuvée ».

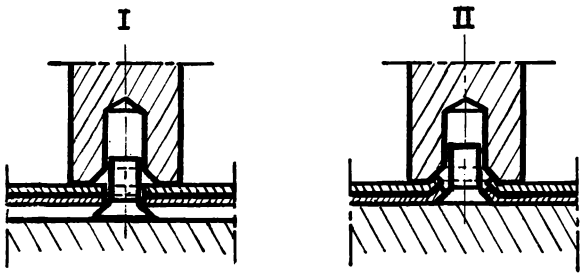


Fig. 53

Rivure abreuvée : pour river deux tôles minces dont l'une ne doit pas présenter de surépaisseur, on emploie un tire-rivet fraisé qui emboutit les tôles: la tête du rivet est abreuvée (fig. 53).

Si la face opposée à celle qui doit être lisse n'est pas accessible, on emboutit préalablement les tôles entre une matrice et un poinçon appropriés (fig. 54).

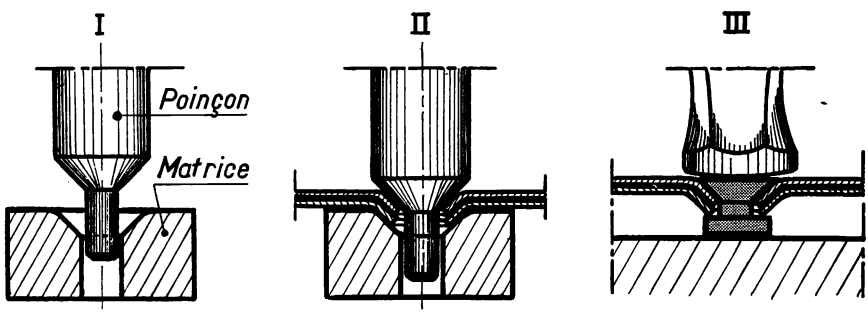


Fig. 54

2 — LE RIVETAGE MÉCANIQUE

Il se fait à froid pour les rivets de 8 et parfois 10 *mm* de diamètre, à chaud pour les rivets de diamètre supérieur.

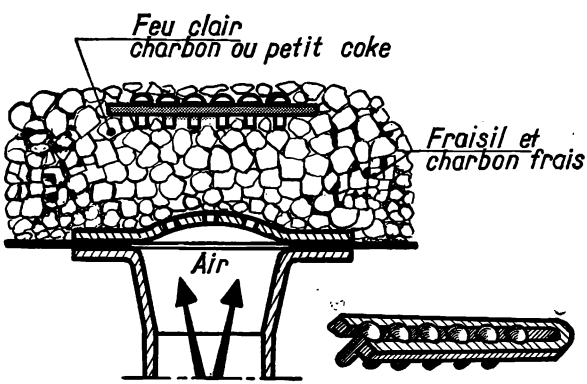


Fig. 55

Le chauffage des rivets est obtenu :

1° ***dans la forge,*** soit en plein feu, soit sur plaque, sur épingle ou dans un tube (fig. 55). Le chauffage est difficile à conduire, une partie des rivets est brûlée, piquée ou encrassée ;

2° ***dans un four*** chauffé au coke (fig. 56), au gaz de ville, au mazout ou au propane ;

3° ***dans un chauffe-rivets électrique*** (fig. 57), produisant de la chaleur par effet Joule. Le rivet est pincé entre deux blocs-électrodes en cuivre, reliés à un transformateur qui les alimente en courant à basse tension et d'intensité élevée.

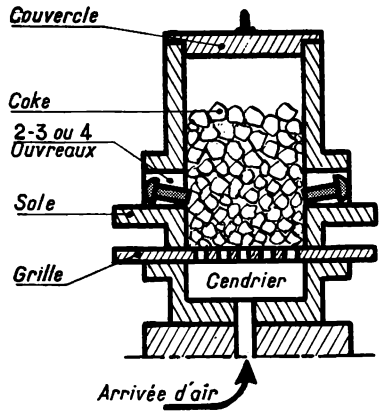


Fig. 56

La durée du chauffage est courte et réglable. La tête du rivet est un peu moins chauffée que l'extrémité de la tige.

Ces appareils se font à 1, 2, 3, 4, 6 têtes de chauffage ; ils sont montés sur roues et se branchent sur les distributions à courant alternatif à tension normale. Leur utilisation est facile et leur rendement élevé.

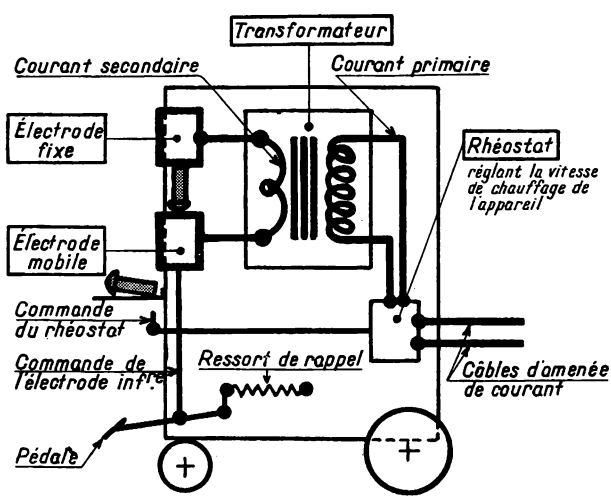


Fig. 57

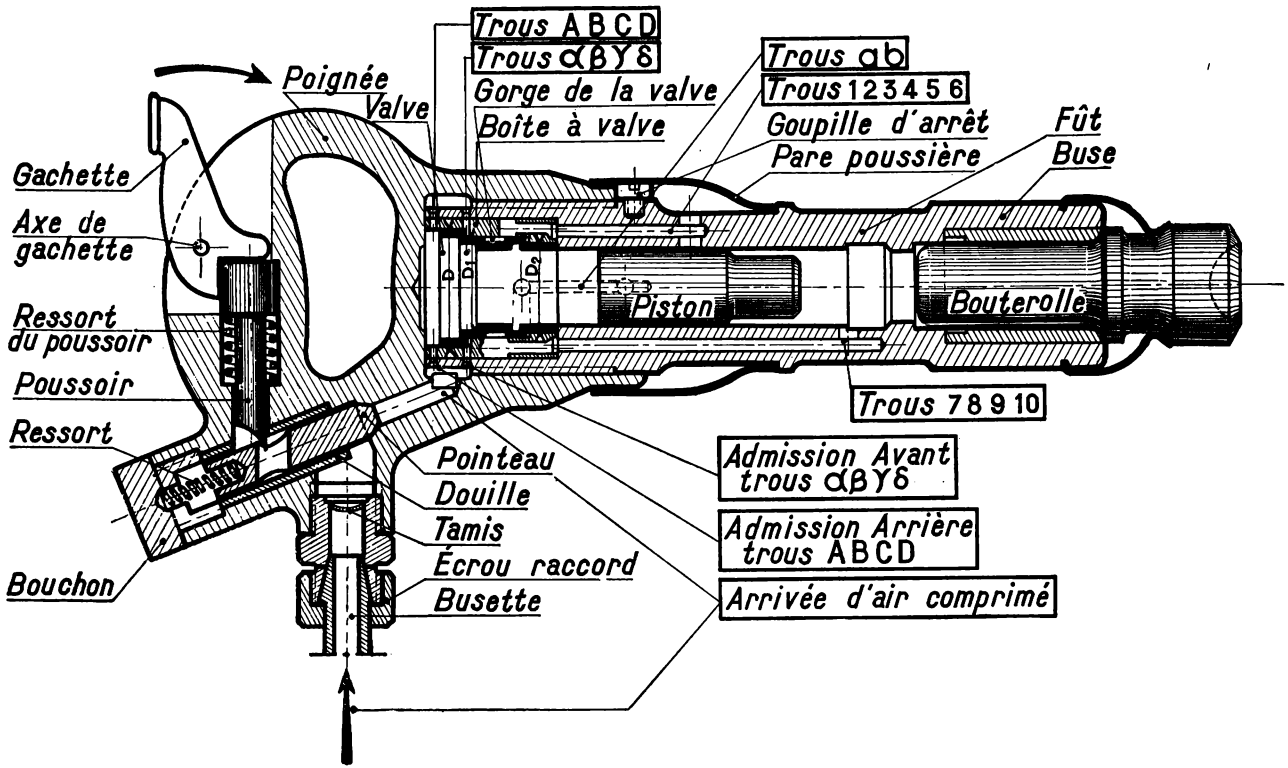


Fig. 58 — Piston fin de course arrière. — Valve fin de course avant.

L'air comprimé arrive par les trous ABCD à l'arrière du piston et le projette à l'avant.

La valve est soumise à une pression agissant sur la différence des surfaces des cercles D et D2, et qui la pousse vers l'avant, ainsi qu'à une pression agissant sur la différence des surfaces des cercles D et D1, qui la pousse vers l'arrière (admission par $\alpha\beta\gamma\delta$).

L'air contenu dans la chambre avant s'échappe par les trous 7 - 8 - 9 - 10, la gorge de la valve et les trous 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6.

Le piston découvre les trous a-b, l'air est admis sur la différence des surfaces des cercles D1 et D2, ce qui augmente la pression vers l'arrière.

Continuant sa course, le piston découvre les trous 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6, ce qui provoque une dépression dans la chambre arrière ; la pression vers l'arrière étant plus forte que la pression vers l'avant, la valve prendra la position fin de course arrière.

Le piston a frappé la queue de l'outil.

soit au ***marteau pneumatique***, soit à la ***presse*** (pneumatique, hydraulique, à huile).

L'air comprimé (5 à 7 bars), qui actionne les marteaux et les presses pneumatiques est fourni par des *compresseurs* qui le refoulent dans des réservoirs; il doit être sec et exempt de poussière.

Une tuyauterie fixe, en cuivre ou en acier galvanisé, part des réservoirs d'air et porte de place en place des *manchons d'attente avec robinet.* Des canalisations mobiles constituées par des tuyaux flexibles (enveloppe de toile résistante noyée dans du caoutchouc et protégée parfois par une spire de fil d'acier ou de ruban métallique) relient les manchons d'attente aux machines-outils (marteaux, riveuses, perçeuses, meules, machines à tarauder, etc.).

Les marteaux pneumatiques employés pour la pose des rivets en acier doux agissent par chocs rapides d'une masse frappante sur une bouterolle (1).

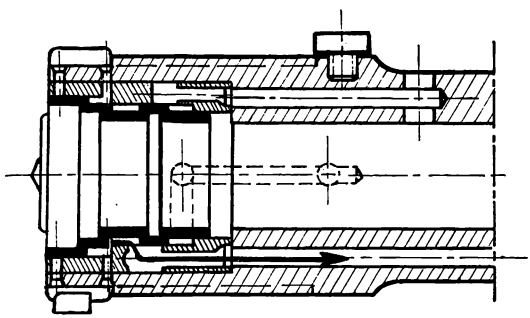


Fig. 59

Les trous d'admission ABCD sont fermés, la valve est uniquement soumise à une pression vers l'arrière. Comme l'indique la flèche, l'air arrive dans la chambre avant par les trous 7-8-9-10, et pousse le piston vers l'arrière. L'air contenu dans la chambre arrière est évacué par les trous 1-2-3-4-5-6. Lorsque le piston ferme les trous 1-2-3-4-5-6, l'air s'évacue par les trous a-b, la gorge de la valve, et les trous 1-2-3-4-5-6.

Continuant sa course vers l'arrière, le piston ferme les trous a-b ; à ce moment, commence une compression dans la chambre arrière qui augmente la pression sur la valve, tendant à lui faire reprendre sa position avant.

Finalement, l'avant du piston découvre les trous 1-2-3-4-5-6 ; la chambre avant est mise à l'échappement. Par les trous 7-8-9-10 il y a dépression sur la différence des surfaces des cercles D et D1 au droit des trous $\alpha\beta\gamma\delta$. La valve reprend sa position de fin de course avant et le cycle recommence.

Le rivet est refoulé directement par la bouterolle que l'ouvrier oriente de la même façon que la bouterolle à main.

L'effort à exercer est relativement faible, mais la réaction du choc produit une trépidation constante de l'outil.

Les figures 58 et 59 montrent le fonctionnement d'un marteau pneumatique.

Les riveuses à air comprimé et les riveuses hydrauliques agissent par pression continue (la pression nécessaire à la formation de la tête d'un rivet en acier doux est supérieure à 100 daN/mm^2 de section de sa tige).

Leur bâti en forme de *C* ou de col de cygne, articulé ou non, porte la ***bouterolle*** sur une branche et la ***contre-bouterolle*** sur l'autre branche.

Ces machines sont fixes ou mobiles; dans ce dernier cas elles sont suspendues à une potence ou à un pont par une attache articulée sur un axe passant par le centre de gravité de l'ensemble. Cette disposition permet de placer facilement la machine dans la position désirée.

(1) La bouterolle peut être remplacée par tout autre outil : burin, matoir, dériveteur, etc.

De nombreuses riveuses sont munies d'un dispositif destiné à accoster énergiquement les pinces avant rivetage.

La figure 60 représente une riveuse hydraulique à mâchoire articulée.

Les figures 61 et 61bis schématisent une riveuse hydraulique, utilisée pour l'assemblage des corps cylindriques.

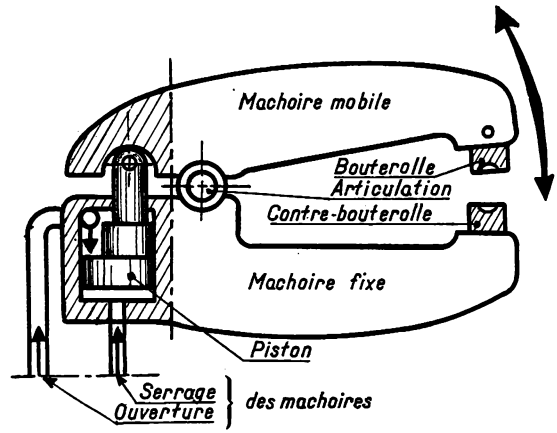


Fig. 60

Pression d'eau: 80 à 150 *bars*

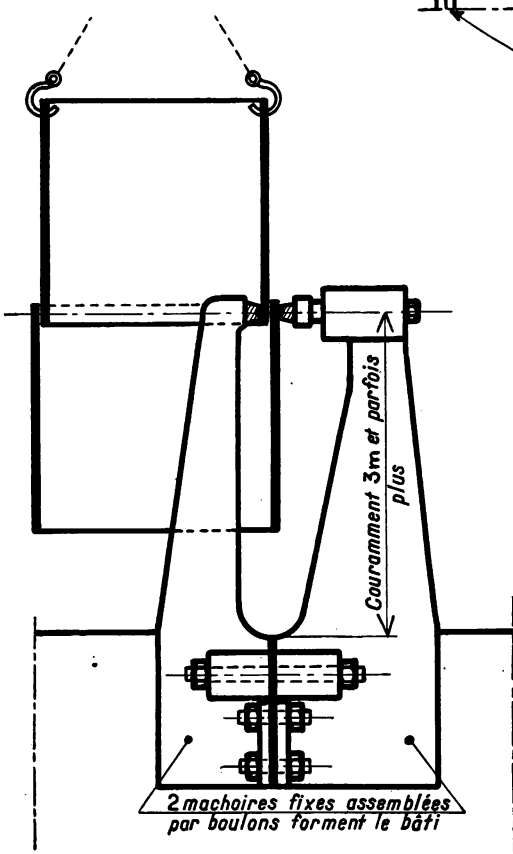


Fig. 61

La figure 62 représente un ***ensemble de presse à river et à poinçonner*** (pour le poinçonnage, la contre-bouterolle est remplacée par une matrice et la bouterolle par un poinçon).

Certains C à river (Sciaky) réalisent à la fois le chauffage et le refoulement du rivet:

Une tige cylindrique est placée à froid dans les trous d'assemblage, elle est chauffée entre deux bouterolles reliées à un transformateur électrique. Les deux têtes sont formées simultanément par pression hydraulique. Le cycle opératoire (chauffage et pression) est commandé électroniquement.

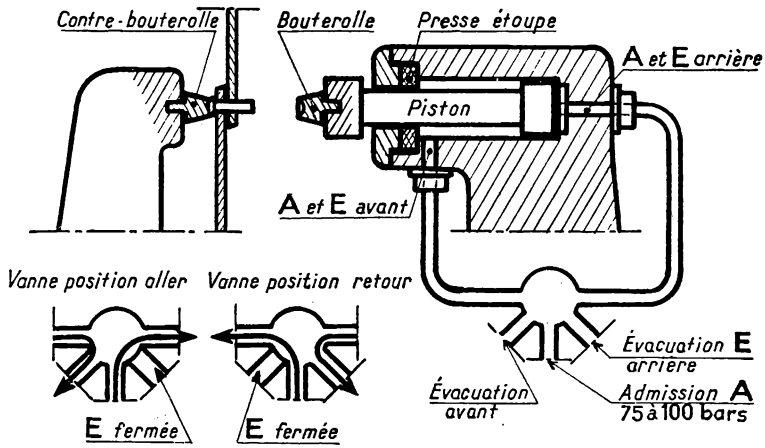


Fig. 61 *bis*

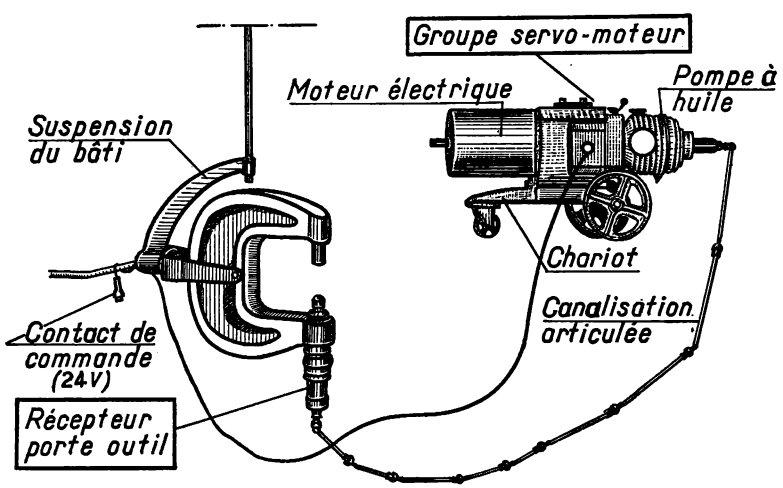


Fig. 62

CONSIDÉRATIONS SUR LES DIFFÉRENTS PROCÉDÉS DE RIVETAGE

Le rivetage par chocs (au marteau à main ou pneumatique) est lent, il nécessite un teneur de tas. Il est assez rare, surtout dans les fortes épaisseurs, que la tige du rivet remplisse exactement le trou de logement (fig. 63). La bouterolle et la contre-bouterolle sont rarement bien axées, la rivure peut être couchée.

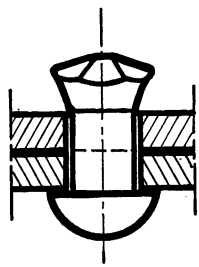


Fig. 63

Rivetage par choc. Déformation en tulipe.

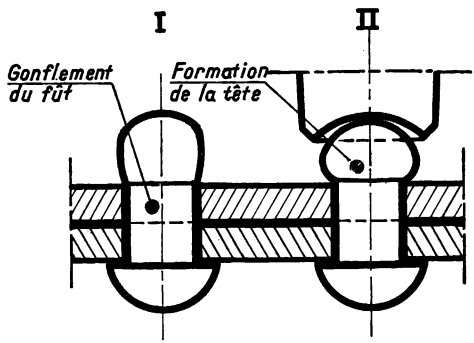


Fig. 64

Rivetage par compression. Déformation en tonneau.

Au contraire, ***le rivetage par compression*** réalisé par les machines, est rapide (il faut néanmoins maintenir la pression jusqu'à ce que le rivet soit assez refroidi pour éviter l'allongement du fût sous l'effet de la réaction de la tôle due à son élasticité) (1). Il y a d'abord gonflement du fût qui remplit bien le trou (fig. 64). L'adhérence des tôles se fait énergiquement par la pression de la machine et aussi par celle due au retrait du rivet pendant son refroidissement.

En raison du bon remplissage des trous, aucun glissement relatif des tôles n'est possible et les corps de rivets ne sont pas soumis à une contrainte de cisaillement comme il peut se faire dans le rivetage par chocs.

ÉTANCHÉITÉ DES RIVURES

Les appareils destinés à être soumis simplement à la pression due au poids d'un liquide (bacs à eau, citernes, etc.), et dont l'épaisseur des parois est inférieure à 4 millimètres, sont rendus étanches en intercalant entre les pinces une ou plusieurs feuilles de papier épais ; le résultat est meilleur si le papier est enduit sur ses deux faces de minium ou de céruse délayés dans de l'huile. On emploie également le papier goudronné.

NOTA. — Ces appareils sont maintenant, d'une manière générale, exécutés par soudage autogène, procédé d'assemblage plus rapide.

(1) Pour cette raison le rivet n'est chauffé qu'à la température du rouge cerise clair (900 à 1 000°C).

Les pinces et les têtes de rivets des appareils soumis à de fortes pressions sont ***matées*** après rivetage, c'est-à-dire fortement pincées sur la tôle par refoulement.

Pour faciliter le matage, les pinces sont *chanfreinées* avant assemblage (fig. 65).

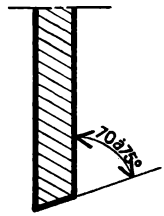


Fig. 65

Le chanfrein est exécuté :

a) ***à la raboteuse-chanfreineuse,*** machine composée essentiellement d'un *chariot porte-outil* qui se déplace parallèlement au bord de la tôle fixée sur une *table horizontale ;*

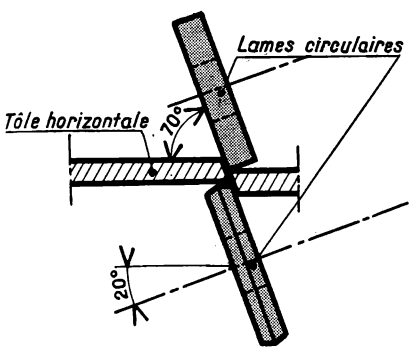


Fig. 66

Principe de fonctionnement d'une cisaille à chanfreiner.

Le rabotage donne un travail propre mais lent et ne convient que pour les bords droits.

b) ***au chalumeau-coupeur*** (meuler les chants avant matage) ;

c) ***à la cisaille à molette*** (fig. 66) ;

d) sur certaines ***cisailles guillotines*** hydrauliques, soit au moyen d'un dispositif de relevage de la table, avec presse-tôle indépendant qui empêche tout glissement ; soit par déplacement d'une lame supérieure suivant un plan incliné.

Les fonds et les plaques circulaires sont chanfreinés au tour.

Le matage des pinces se fait à l'aide de matoirs (fig. 67 à 71) généralement

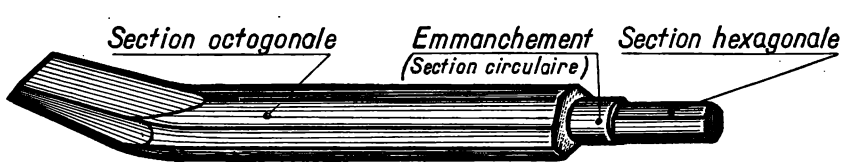


Fig. 67

montés dans un marteau pneumatique. Le matoir doit agir normalement au chanfrein sans attaquer la tôle inférieure (fig. 72, 73 et 74).

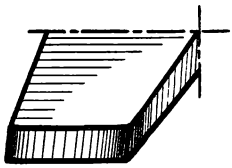


Fig. 68
Lisse

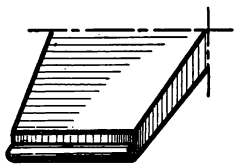


Fig. 69
A talon

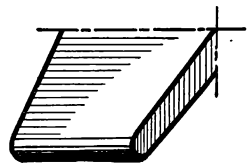


Fig. 70
Rond

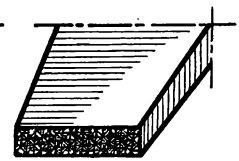


Fig. 71
Bouchardé

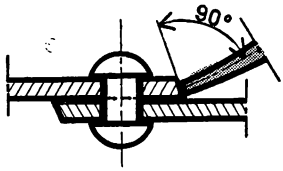


Fig. 72
Position correcte du matoir.

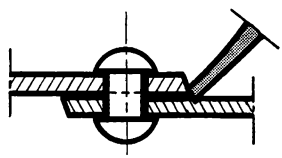


Fig. 73
Matoir trop relevé: entaille la tôle inférieure.

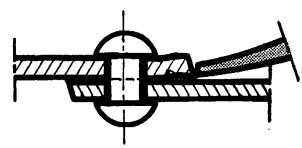


Fig. 74
Matoir trop incliné, la pince tend à se soulever.

Les tôles peu épaisses sont matées en une seule passe (matoir plat, rond ou à talon). Les tôles épaisses sont matées en deux passes, la première avec un matoir rond, la seconde avec un matoir plat.

Le matoir quadrillé ou boucharde, employé fréquemment pour exécuter la première passe, ne devrait être utilisé que pour mater une fissure, car ses stries mâchent et abîment la tôle.

Les tôles assemblées bout à bout sont matées rapidement avec un matoir double (fig. 75).

Les pinces intérieures des chaudières sont matées comme les pinces extérieures.

Le matage des têtes de rivets s'obtient avec un matoir en forme de *gouje* (fig. 76) plus ou moins coudée selon que la tête est ronde ou plate (fig. 77).

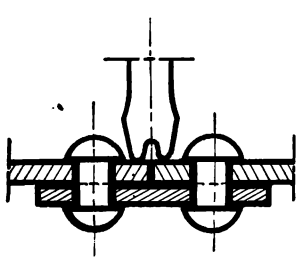


Fig. 75

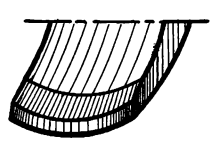


Fig. 76

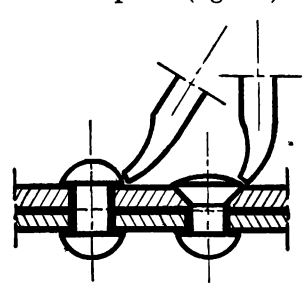


Fig. 77

REMARQUES. — 1° En coupant, après rivetage, la bavure des rivets *Rb*, on exécute en même temps le matage.

2° Les goujons vissés sont matés en resserrant la tôle autour de leur tige (fig. 78).

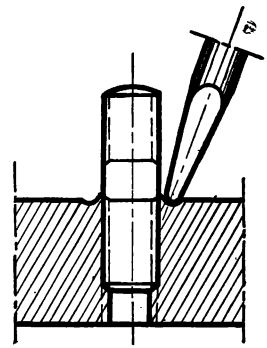


Fig. 78

PRINCIPAUX DÉFAUTS DES RIVURES

Ils peuvent provenir:

a) ***d'une mauvaise préparation des tôles:***

— les trous ne sont pas en face l'un de l'autre (fig. 79), grave défaut soumettant le rivet à une contrainte de cisaillement ;

— les tôles sont insuffisamment serrées l'une contre l'autre (fig. 80): il y aura fuite ;

— le jeu entre le trou et le fût du rivet est trop grand: le rivet se couche (fig. 81) ;

b) ***d'un chauffage excessif du rivet*** qui peut être brûlé en partie: au refroidissement, le fût se contracte et ne remplit plus son logement (fig. 82) ;

c) ***d'un refoulement mal centré de la tige:*** la rivure est désaxée (fig. 83) ; ***ou insuffisant:*** la rivure est mal pincée (fig. 84) ;

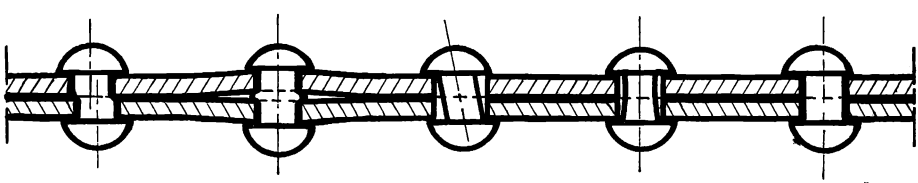


Fig. 79 Fig. 80 Fig. 81 Fig. 82 Fig. 83

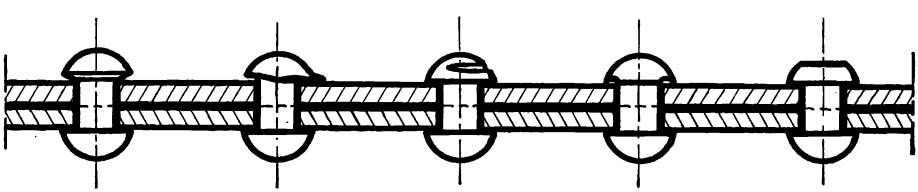


Fig. 84 Fig. 85 Fig. 86 Fig. 87 Fig. 88

d) ***d'une mauvaise tenue de la bouterolle:*** formation d'une bavure diamétralement opposée à un manque de métal (fig. 85), ou tête entaillée par la bouterolle (fig. 86);

e) ***d'un manque de métal:*** la rivure, qui peut être d'apparence normale, ne porte pas sur la tôle (fig. 87) ou se termine par un plat (fig. 88).

NOTA. — L'excès de métal ne constitue pas un grand défaut, il produit une bavure que l'on coupe ensuite au burin. On utilise souvent des rivets un peu trop longs afin d'être certain d'avoir assez de métal pour former une tête qui porte bien, le burinage de la bavure amorce le matage de la rivure.

DÉRIVETAGE

Pour enlever un rivet mal posé on commence par faire sauter la tête, soit au *burin* (fig. 89), soit à la *tranche* (fig. 90) ; on chasse ensuite le rivet au moyen d'une broche.

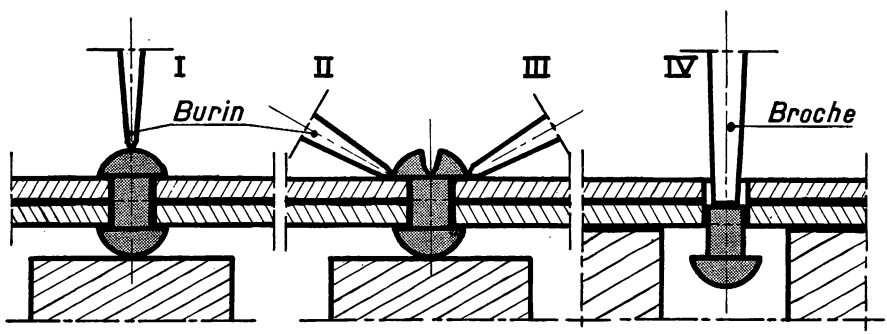


Fig. 89

On emploie couramment le chalumeau coupeur qui donne des résultats aussi nets et beaucoup plus rapides. On opère de deux façons:

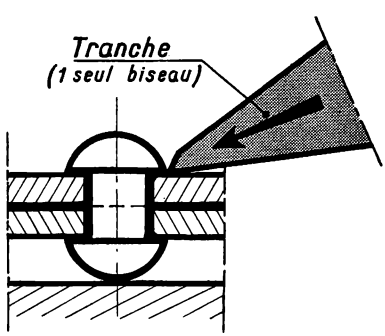


Fig. 90

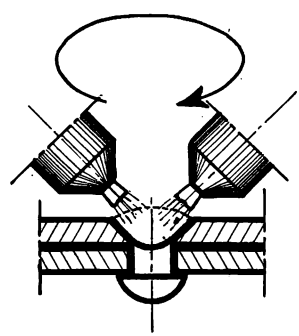


Fig. 91

1º Avec un *chalumeau coupeur ordinaire*. On détruit partiellement la tête et le corps du rivet (fig. 91) ; ce procédé est surtout employé sur les rivets à têtes fraisées et fraisées-bombées.

2° On coupe la tête au ras de la tôle avec un *chalumeau dériveteur :* chalumeau coupeur muni d'une tête aplatie que l'on applique sur la tôle ; la flamme est constituée par deux dards entre lesquels se trouve l'orifice de sortie de l'oxygène de coupe (fig. 92).

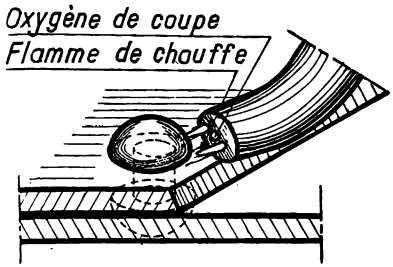


Fig. 92

Après destruction partielle ou totale de la tête, on chasse le fût à l'aide d'une broche.

REMARQUE. — Pour éviter la déformation des tôles minces, on meule ou on lime les têtes des rivets, les fûts sont détruits par perçage à un diamètre légèrement inférieur pour ne pas attaquer la tôle.

CHAPITRE VI

LE SOUDAGE A L'ÉTAIN

EMPLOI ET COMPOSITION DES SOUDURES A L'ÉTAIN

L'étain a un point de fusion très bas (231 °C), mais c'est un métal cassant. Pour augmenter la solidité de l'assemblage, on emploie l'***alliage étain-plomb*** dont le point de fusion varie avec la proportion du mélange.

Le point de fusion s'abaisse lorsque la teneur en plomb diminue jusqu'à 43 % ; en deçà de ce pourcentage, le point de fusion s'élève.

La fusibilité de la soudure peut être augmentée en lui ajoutant du *bismuth* (1); ainsi, les soudures employées pour le soudage de pièces délicates de bimbeloterie ont un point de fusion inférieur à 100 °C.

Les appareils ou récipents à usage alimentaire sont soudés à l'étain pur toutefois un peu de plomb est toléré (— de 3 %).

Le soudage à l'étain s'exécute sur pièces jointes par *recouvrement* (fig. 1 et 2)

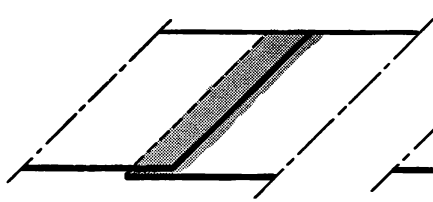


Fig. 1
Soudure à cœur.

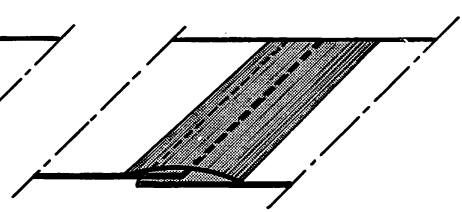


Fig. 2
Soudure chargée.

(1) Le bismuth (Bi) est un métal d'un blanc gris, un peu rougeâtre, d'une densité de 9,82; il fond à 268 °C.

ou par emboîtage (fig. 3, 4 et 5) pour augmenter la surface de contact, jamais bout à bout.

La soudure pénètre dans le joint par capillarité ; le jeu entre les parties à réunir doit donc être réduit au minimum.

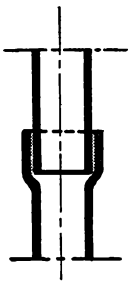


Fig. 3

Emboîtage de tuyaux d'acier ou de cuivre.

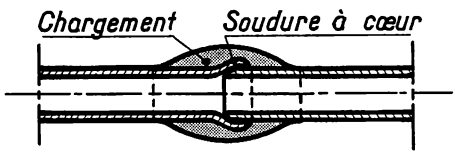


Fig. 4

Emboîtage de tuyaux de plomb dit « nœud de jonction ».

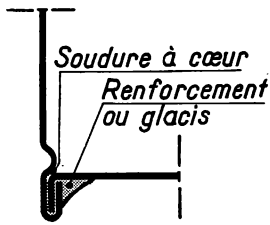


Fig. 5

Soudage d'un fond.

Les soudures les plus courantes et leurs emplois sont indiqués dans le tableau ci-après.

Désignation	Composition		Point de fusion	Qualités et emplois
	Pb	*Sn*		
Extra-fine	40	60	195 °C	Les points de fusion sont inférieurs à celui de l'étain.
Fine	50	50	205 °C	Employées pour souder les pièces en alliages d'étain et les petites pièces de ferblanterie.
Claire	60	40	215 °C	Très fluide, elle pénètre bien entre les surfaces en contact, Très employée en ferblanterie et petite cuivrerie.
Du chaudronnier, dite au tiers	67	33	250 °C	Petite chaudronnerie de cuivre, laiton, tôles étamées, plombées ou galvanisées.
Du plombier	70	30	260 °C	Soudage du cuivre sur le plomb (douilles, raccords, robinets).
	75	25	270 °C	Peu fluide. Soudage des tuyaux de plomb (nœuds de plomberie) chargement des soudures.

PRÉSENTATION ET FABRICATION DE LA SOUDURE

La soudure à l'étain se trouve dans le commerce sous forme de ***baguettes*** de section demi-ronde (∅ 10 à 12 *mm* environ), ou de ***targettes*** de section rectangulaire (40 × 6 *mm* environ).

On peut également la préparer à l'atelier.

Fabrication à l'atelier : 1. — Le point de fusion du plomb (327,4 °C) étant plus élevé que celui de l'étain, on commence par fondre le plomb dans une marmite en fonte ou en acier.

S'il est fait usage de déchets de plomb très sales, on ajoute au moment de la fusion un mélange constitué d'une partie de résine, de deux parties de soufre, de quatre parties de sel ammoniac et d'un peu de charbon de bois pulvérisé.

II. — Après écumage des crasses, on ajoute l'étain, puis un peu de suif ou de résine pour protéger le bain contre l'oxydation.

III. — On brasse le mélange avec une spatule en acier, on écume les crasses qui surnagent et on ajoute un peu de résine ou de chlorure de zinc.

IV. — On coule dans des moules (fig. 6, 7) *préalablement chauffés* afin d'éliminer toute trace d'humidité qui pourrait provoquer des projections dangereuses de métal fondu entraînant de graves brûlures.

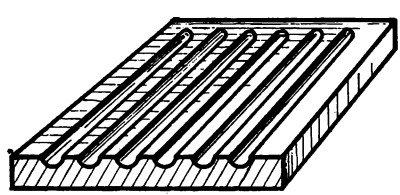


Fig. 6
Moule en fonte.

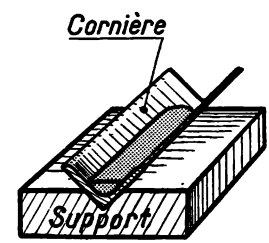


Fig. 7
Emploi d'une cornière.

NOTA. — Pendant l'opération, afin d'éviter de «*brûler*» l'alliage, contrôler la température au moyen d'une feuille de papier qui doit jaunir au contact du bain, mais ne doit pas noircir (surchauffe).

PRÉPARATION DES PIÈCES A SOUDER

Pour réaliser une bonne soudure à l'étain, il faut que l'alliage constituant la soudure adhère intimement sur toutes les surfaces en contact et que celles-ci soient réunies par le minimum de soudure.

POUR QUE LA SOUDURE ADHÈRE SUR LE MÉTAL, IL FAUT QUE CELUI-CI SOIT :

a) **d'une propreté absolue,** c'est-à-dire débarrassé de toute trace d'oxyde. Ceci est obtenu:

1° ***avant soudage,*** en mettant le métal à nu par un moyen *mécanique* (limage, grattage, sablage), ou *chimique* (emploi d'un décapant) ;

2° ***pendant le soudage,*** en faisant usage d'un *fondant* dont le rôle est de former des composés facilement fusibles avec les oxydes qui naissent pendant la fusion de la soudure ;

b) **porté à une température suffisante** pour que la soudure reste un certain temps liquide et puisse couler, « *filtrer* », à travers les pinces ou l'emboîtage.

LES DÉCAPANTS

Le décapant le plus utilisé pour la préparation des pièces à souder est l'***acide chlorhydrique*** (HCl), ou *acide muriatique* communément appelé *esprit de sel.*

L'acier et le cuivre se décapent également à l'***acide sulfurique*** ou *vitriol* dilué (un litre d'acide à 66° Baumé pour 9 litres d'eau) ($H_2 SO_4$). Pour préparer le mélange, dans un bac doublé de plomb, verser lentement l'acide dans l'eau et non l'eau dans l'acide, ce qui provoquerait des projections pouvant causer des brûlures graves.

Le laiton et le cuivre très oxydé se décapent à l'***acide azotique*** ($H NO_3$) concentré dit également *acide nitrique ou eau forte.*

Le ***chlorhydrate d'ammoniac*** ou *sel ammoniac* réduit les oxydes à la chaleur, il est utilisé en poudre pour l'étamage et en pain pour le décapage et l'étamage du fer à souder.

LES FONDANTS

Le chlorure de zinc ($Zn Cl_2$), appelé souvent ***esprit de sel décomposé,*** ou encore ***sauce,*** est le fondant le plus employé. Le chaudronnier le prépare en versant dans un récipient en plomb de l'acide chlorhydrique et des déchets de zinc ; l'acide attaque le zinc, il se dégage des vapeurs acides et de l'hydrogène. Il y a intérêt à faire ce travail à l'extérieur de l'atelier et à enflammer les vapeurs

pour éviter qu'elles ne se répandent dans l'atmosphère. Lorsque le zinc n'est plus attaqué, laisser reposer le liquide et le filtrer. Pour neutraliser l'effet de l'acide, qui rouille les pièces en acier doux ou en fer-blanc, on peut ajouter une quantité de sel ammoniac égale au tiers du volume du liquide.

Un peu d'eau dans le chlorure de zinc évite de noircir les pièces.

La résine permet de réaliser des soudures plus résistantes et d'un plus bel aspect que le chlorure de zinc, mais les parties à souder doivent être parfaitement étamées ; la moindre malpropreté se mêle à la résine, forme une crasse qui empêche l'étain d'adhérer et laisse une fuite ; au contraire, le chlorure de zinc, à la chaleur, décape les points manquant de netteté et facilite ainsi le soudage.

La résine est surtout employée lorsqu'on ne peut pas rincer facilement les pièces soudées, notamment les boîtes renfermant des aliments.

L'huile d'olive s'emploie parfois pour le soudage de pièces parfaitement étamées à l'étain fin (étain pur) ; elle est également utilisée pour le soudage des poteries d'étain.

La stéarine, le suif, la bougie sont les fondants employés pour l'étamage et le soudage à l'étain du plomb.

L'OUTILLAGE DE CHAUFFAGE

Il assume un double rôle:

1° fondre la soudure ;

2° porter le joint à souder à la température de fusion de l'alliage pour lui permettre de filtrer sur toute la surface.

On emploie couramment les fers à souder, parfois les chalumeaux (gaz — air comprimé, aéroacétylénique ou oxyacétylénique, mais ce dernier avec précaution afin d'éviter un surchauffage). ***La lampe à souder*** est surtout utilisée par les plombiers.

LES FERS A SOUDER

Selon les travaux à exécuter (volume des pièces et position de la soudure), Ils sont de dimensions et de formes variables.

Quels que soient leur forme et le moyen utilisé pour les chauffer, ils sont toujours constitués par une *masse de cuivre*, métal bon conducteur de la chaleur, qui s'étame facilement et résiste bien à la corrosion.

Les plus simples sont rivés sur une monture en acier doux, terminée par un manche en bois. On distingue:

— **le fer couteau,** ***coudé*** (fig. 8 et 10), d'un emploi général, ou ***droit*** (fig. 9), utilisé pour le soudage intérieur de fonds de récipients profonds ;

— **le fer biseau** (fig. 11) à droite ou à gauche, également très employé ;

— **le fer carré** (fig. 12), utilisé pour l'étamage de parties étroites et surtout pour former les *glacis* (renforcement des soudures).

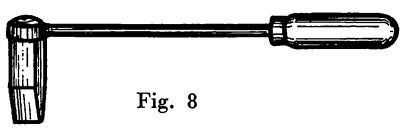


Fig. 8

Fig. 9

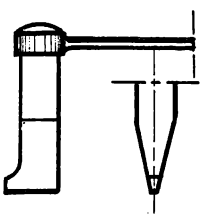


Fig. 10

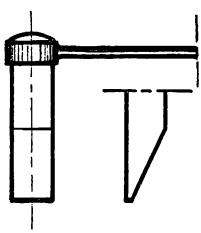


Fig. 11

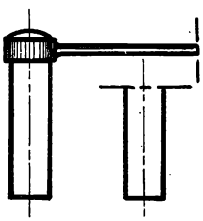


Fig. 12

Tous ces fers sont chauffés sur un *feu clair* de coke ou de charbon de bois, la partie active au-dessus du feu. Ils ont l'inconvénient de se refroidir rapidement, de s'encrasser à chaque chauffage, de nécessiter l'emploi de deux fers (l'un qui chauffe pendant que l'autre est en fonction) et l'entretien d'un feu; on leur préfère ***les fers auto-chauffants,*** d'un rendement supérieur, tels que :

— **le fer aéro-gaz** (fig. 13) pour petits travaux de ferblanterie ;

— **le fer air comprimé-gaz** pour travaux de petite chaudronnerie.

La monture représentée figure 14 offre la possibilité d'incliner le fer à volonté de plus une partie *f* de la flamme concourt à l'échauffement de la pièce, augmentant ainsi la fluidité de la soudure et la rapidité du travail.

Au contraire, *le fer à déflecteur* (fig. 15) protège les pièces délicates de l'action de la flamme qui pourrait les déformer.

Le fer aéro-acétylénique et le **fer aéro-propane** (fig. 16) peuvent être utilisés sur chantier ainsi que **le fer à essence,** basé sur le principe de la lampe à souder.

Le fer à résistance électrique peut être employé pour l'exécution de petits travaux.

Le fer doit toujours être parfaitement étamé, non seulement sur sa surface extrême, mais aussi sur ses quatre faces, sur une hauteur d'au moins un centimètre de façon à « *porter* » suffisamment de soudure.

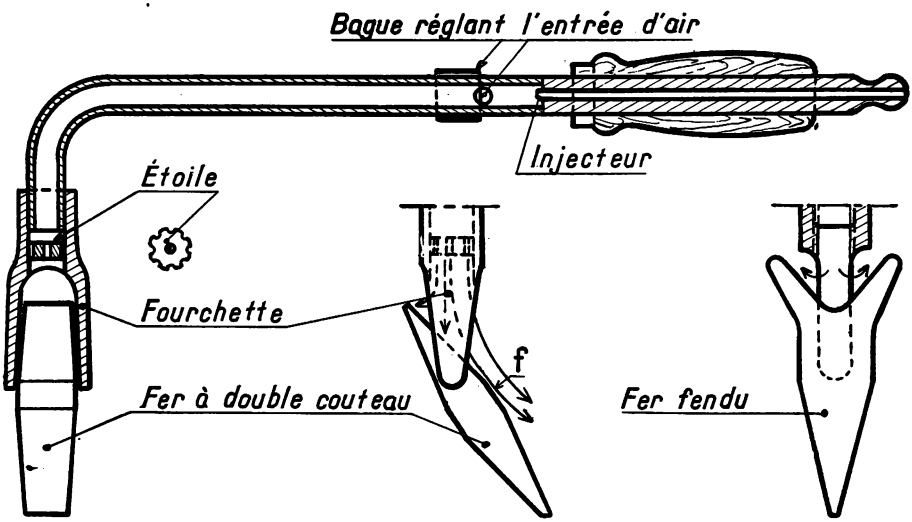


Fig. 13 Fig. 14 Fig. 15

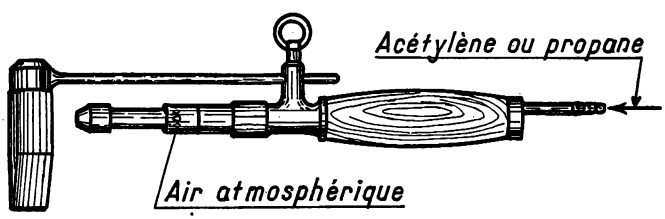


Fig. 16

Le fer ne doit jamais rougir, car la surchauffe brûle l'étain et oxyde le cuivre.

Après usage, vérifier si le fer est bien étamé et essuyer la partie étamée avec un linge mouillé.

Étamage du fer : si le fer a été surchauffé ou reforgé, le mettre à nu en le limant ; après chauffage, le frotter sur la pierre ammoniaque tout en appuyant l'extrémité de la baguette d'étain sur la partie à étamer. On peut aussi plonger le fer dans le chlorure de zinc et frotter la baguette d'étain en recommençant l'opération jusqu'à parfait étamage.

NOTA. — Étamer à l'étain pur de préférence à la soudure.

EXÉCUTION DE LA SOUDURE

Avant l'exécution de la soudure, les joints doivent être préparés avec soin, c'est-à-dire mis à nu, étamés et maintenus étroitement en contact.

Si les pièces sont décapées, on les rince à l'eau courante pour éliminer toute trace d'acide.

REMARQUE. — Le zinc et la tôle galvanisée propre sont décapés au moment même de la soudure par l'acide chlorhydrique. Celui-ci, après réaction, donnera du chlorure de zinc qui constituera le fondant. Si le métal est très oxydé, le gratter avant décapage.

ÉTAMAGE DES PARTIES A SOUDER

a) déposer le chlorure de zinc au pinceau, ou la résine en poudre, sur les parties à étamer ;

b) déposer une légère couche d'étain à l'aide du fer maintenu en place le temps nécessaire à l'élévation de température de la pièce. Si la pièce est de dimensions importantes, chauffer la partie à étamer au chalumeau, frotter celle-ci avec la baguette de soudure qui fondra, étendre la soudure, sans surcharger, avec un tampon d'étoupe.

REMARQUES. — Il est évident que le fer-blanc n'a pas besoin d'être étamé.
— Il est préférable d'étamer la tôle plombée après avoir gratté le plomb.
— Le zinc neuf peut se souder sans étamage préalable, ainsi que la tôle galvanisée.

SOUDAGE

Après étamage, ajuster les parties à souder et les maintenir solidement en contact. Choisir un fer d'une grosseur appropriée au volume de la pièce ; le chauffer sans excès: sa température est convenable lorsque, frotté sur la pierre ammoniaque, une fumée âcre se dégage.

Appliquer le fer *chaud et propre* sur la partie à souder garnie de fondant, après avoir pris un peu de soudure en frottant l'extrémité du fer sur la baguette.

Faire un point de soudure à chaque extrémité, ou de place en place si la ligne de soudure est longue.

Souder en déplaçant le fer lentement, sans revenir en arrière, de façon à chauffer le métal jusqu'à la température de fusion de la soudure: celle-ci pénètre bien entre les pinces, on réalise ainsi une ***soudure à cœur***. Pour les travaux importants, déposer la soudure en frottant la baguette sur le fer placé sur la pièce qu'on incline légèrement pour faciliter l'écoulement de la soudure.

Pour souder le zinc, il ne faut pas prendre un fer trop lourd, ni trop chaud qui risquerait de fondre le métal (point de fusion : 420 °C).

Une soudure chargée s'exécute en deux temps:

1° ***soudage à cœur.***

2° ***renforcement,*** en déposant de la soudure à l'aide du fer carré que l'on déplace d'une longueur à chaque fois, ce qui donne à la soudure un aspect saccadé.

FINITION

Après soudage, laver la soudure à l'eau courante pour éliminer toute trace d'acide qui noircirait la pièce.

On peut enlever l'excédent de soudure sur pièce de cuivre, de laiton, de zinc ou de plomb soit au grattoir, soit à la lime, mais cette pratique doit être prohibée pour les pièces en fer-blanc, en tôle plombée ou en tôle galvanisée: limage ou grattage enlèverait la couche de métal protecteur.

CHAPITRE VII

LE SOUDAGE AU CHALUMEAU

Le soudage au chalumeau est réalisé *par fusion du métal* au moyen d'une flamme obtenue à la sortie d'un chalumeau.

Les flammes soudantes

La première flamme utilisée pour la fusion des métaux fut — en 1837 — la flamme ***air-hydrogène,*** dont la température maximale atteint *1600 °C.* Desbassyns de Richemont, premier utilisateur, imagina également, vers la même époque, un chalumeau ***oxy-gaz*** dans lequel le combustible était le *gaz de houille* et l'*oxygène* le comburant. Les résultats ne furent pas encourageants ; Georges Claude perfectionna ce chalumeau en 1906, mais les propriétés de la flamme obtenue ne permirent pas son emploi industriel.

Sainte-Claire Deville utilisa la flamme ***oxyhydrique*** en 1850 (température maximale : *2600 °C*) et construisit un appareil qui ressemblait déjà aux chalumeaux actuels.

En 1895, Henri Le Chatelier étudia la flamme ***air-acétylène*** et ensuite la flamme ***oxyacétylénique*** (température supérieure à *3100 °C*).

C'est en 1901 que l'ingénieur Ch. Picard présenta en public le premier chalumeau soudeur oxyacétylénique.

Récemment, on a essayé d'utiliser d'autres gaz avec l'oxygène: l'*éthylène*, le *butane* et le *propane*.

NOTA. — Les flammes *oxypropane* et *oxyacétylénique* sont très employées pour le chauffage de tôles, de tubes ou de profilés divers, formés à chaud.

La flamme oxyacétylénique

C'est la plus intéressante des flammes soudantes: sa température est la plus élevée, elle nécessite le moins d'oxygène pur préalablement mélangé, elle contient le moins de vapeur d'eau, elle est la seule à comporter une zone réductrice qui protège le métal fondu de l'oxydation, elle est en outre d'un réglage facile.

Elle est la seule employée pour le soudage au chalumeau de l'acier.

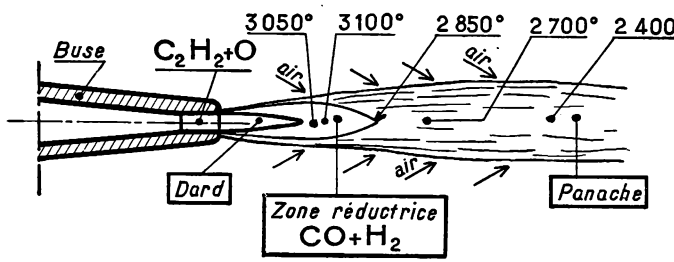


Fig. 1

Elle résulte de la combustion de 1 *volume d'acétylène* (gaz combustible) et de 2,5 *volumes d'oxygène* (gaz comburant) dont 1 volume seulement d'oxygène pur et 1,5 emprunté à l'air ambiant (fig. 1).

Les matières premières du soudage oxyacétylénique

L'OXYGÈNE

C'est un gaz incolore, inodore et insipide.

Il a pour symbole la lettre *O*. Un litre d'oxygène à 15 °C, sous la pression atmosphérique, a une masse de 1,38 *g*. C'est l'agent comburant de presque toutes les flammes à combustion vive.

MODE DE PRODUCTION

Industriellement, l'oxygène s'extrait soit par *électrolyse de l'eau*, soit par *rectification de l'air après sa liquéfaction* obtenue à — 183 °C. Ce dernier procédé est le plus employé: moins coûteux que l'électrolyse, il fournit un oxygène dont l'impureté est constituée surtout par de l'*azote* qui ne présente aucun inconvénient à l'opération de soudage (son influence est plus sensible sur l'oxy-coupage). Au contraire, l'oxygène provenant de l'électrolyse de l'eau contient de l'*hydrogène* qui, même à faible concentration, peut provoquer un mélange explosif.

BOUTEILLES D'OXYGÈNE

L'oxygène est livré dans des cylindres d'acier (1), nommés tubes ou bouteilles, dans lesquels il est comprimé à la pression de 150 *bars*.

Ces bouteilles sont exécutées en acier spécial très résistant ($R = 80\ daN/mm^2$). Elles sont éprouvées à une pression minimale de 225 bars, cette épreuve doit être renouvelée tous les trois ans. Elles ont différentes contenances depuis 0,5 m^3 jusqu'à 8 m^3 (volume du gaz ramené à la pression atmosphérique) ; les plus couramment employées sont de 5 et de 7 m^3.

La partie inférieure est frettée d'un pied carré qui permet de les maintenir en position verticale.

La partie supérieure, en forme d'ogive, reçoit le robinet, nommé ***valve,*** servant au remplissage et à la sortie de l'oxygène.

Un chapeau indémontable en acier protège la valve contre les chocs.

La valve est manœuvrée au moyen d'un écrou nécessitant une clé spéciale.

REMARQUE. — L'emploi d'acier à hautes caractéristiques mécaniques et les progrès réalisés en forgeage ont permis d'exécuter des bouteilles plus minces donc plus légères pour la même capacité : 65 *kg* pour 7 m^3 à 150 *bars* de pression au lieu de 87 *kg*.

D'autre part, on fabrique des bouteilles en acier spécial à haute limite d'élasticité dans lesquelles la pression de remplissage est portée à 200 *bars*, elles contiennent 10 m^3 de gaz et ont une masse de 60 kg.

Afin d'éviter toute confusion avec des bouteilles contenant un gaz différent, l'ogive est peinte en blanc et porte la marque ***OXY.***

Les dates de mise en service et les dates des épreuves successives sont poinçonnées sur l'ogive ; on peut lire également sur celle-ci la contenance en litres d'eau.

Cette dernière indication permet de connaître à tout instant, par un calcul simple, le contenu Q en oxygène de la bouteille en appliquant la loi de Mariotte:

$$Q = V \times P$$

1) On en fabrique également, ainsi que des bouteilles d'acétylène dissous, en alliage d'aluminium, soit en AG 5 (alliage d'aluminium à 5 % de magnésium), soit en AU$_4$G (duralumin).

V représente le volume en eau de la bouteille et P la pression indiquée par le manomètre.

EXEMPLE. — $V = 33{,}3$ *litres*; $P = 40$ *bars*; $Q = 33{,}3 \times 40 = 1332$ litres d'oxygène.

REMARQUE. — La loi de Mariotte ne donne qu'un résultat approximatif mais suffisant dans la pratique, notamment pour chiffrer la consommation d'oxygène en vue de l'établissement d'un prix de revient.

CENTRALE DE DÉTENTE D'OXYGÈNE

Les ateliers qui font une grande consommation d'oxygène ont avantage à grouper plusieurs bouteilles d'oxygène dans un ***poste central*** où le gaz est détendu à une pression minimale compatible avec le bon fonctionnement des chalumeaux (soudeurs et coupeurs) (fig. 2).

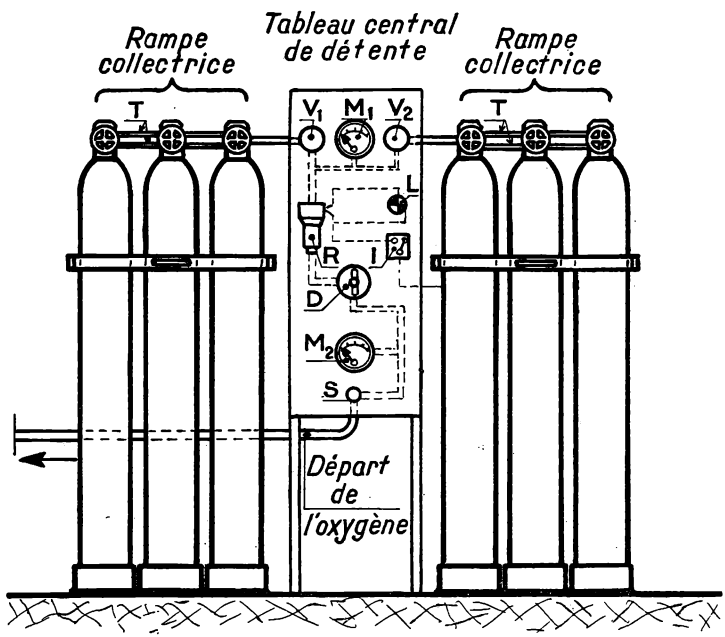


Fig. 2

T : tuyauterie métallique souple réunissant chaque bouteille à la rampe collectrice.
M_1 : manomètre HP indiquant la pression dans le groupe de bouteilles en service.
V_1-V_2 : valves (1 ouverte, 2 fermée).
R : réchauffeur électrique.
I : interrupteur commandant le réchauffeur.
L : lampe témoin.
D : détendeur.
M_2 : manomètre B-P.
S : sectionnement B-P.

Les centrales d'oxygène sont constituées par ***deux rampes collectrices*** dont l'importance, c'est-à-dire le nombre de bouteilles accouplées, est proportionnée aux débits de gaz envisagés.

Quand une rampe est épuisée, l'autre est mise en fonctionnement, ce qui assure un débit ininterrompu.

La centrale supprime la manutention des tubes aux multiples postes individuels, d'où résulte une économie appréciable de main-d'œuvre ; elle permet également le contrôle des pressions d'utilisation et de la vidange des bouteilles.

Dans les centrales à grand débit il est intéressant de recevoir l'oxygène par groupes de bouteilles réunies en faisceau et connectées par des tuyauteries montées une fois pour toutes. Ce groupage constitue un ***cadre de bouteilles*** qui représentent l'équivalent d'une bouteille unique de grande capacité, ex.: 28 bouteilles groupées ont une capacité de 200 m^3 (fig. 3).

On groupe également des bouteilles classiques ou de grandes capacités montées à demeure sur des châssis de semi-remorques ou de wagons.

EXEMPLE : semi-remorque de 1 000 m^3.

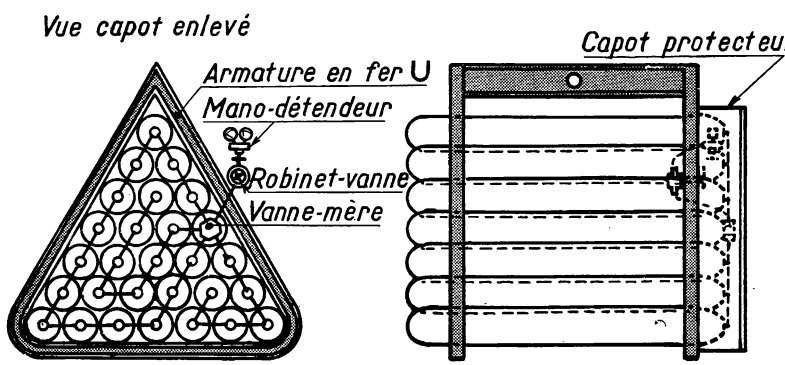


Fig. 3

Du poste central de détente part une canalisation fixe qui distribue l'oxygène détendu à chaque poste de soudage de l'atelier.

Les canalisations d'oxygène se font en tubes d'acier, noir ou galvanisé, ou en tubes de cuivre peints en blanc (couleur normalisée). Les tubes sont assemblés de préférence par soudage ou soudo-brasage ; les joints vissés doivent être réduits au strict minimum.

Le diamètre des tubes est étudié en fonction du débit et de la longueur de la canalisation pour tenir compte de la perte de charge.

L'étanchéité des joints se vérifie en déposant de l'eau savonneuse ou en présentant un morceau d'amadou en ignition qui s'enflamme dès qu'il rencontre la moindre fuite d'oxygène.

POUR SUPPRIMER LES RISQUES D'EXPLOSION DES BOUTEILLES D'OXYGÈNE

explosion comparable à celle d'un puissant explosif, il faut:

— ***éviter les chocs et les chutes de bouteilles*** surtout en charge ;

— ***ne jamais placer une bouteille d'oxygène à proximité d'une source de chaleur:*** la dilatation du gaz qui en résulterait augmenterait considérablement la pression qui pourrait devenir dangereuse. Une augmentation de température de 10 °C élève la pression de 6 *bars* ;

— ***ne jamais graisser les valves des bouteilles*** car l'oxygène sous pression peut provoquer l'inflammation des corps gras par simple contact.

RAVITAILLEMENT SOUS FORME D'OXYGÈNE LIQUÉFIÉ

La société l'Air liquide a mis au point un système de transport ***d'oxygène liquide*** au moyen de ***camions-tanks*** transportant de 4 000 à 10 000 litres d'oxygène liquide.

L'installation du consommateur comprend:

1° **Un réservoir appelé évaporateur,** réservoir parfaitement isolé grâce à l'emploi d'un vide très poussé avec isolant en poudre entre les doubles parois du calorifuge. La pression à l'intérieur de l'évaporateur est de 10 *à* 15 *bars*. Il existe des évaporateurs de 100, 3 000 et 10 000 litres ; sachant que, à la température ambiante et à la pression atmosphérique, l'oxygène liquide occupe un volume 850 fois moindre qu'à l'état gazeux, ces évaporateurs représentent l'équivalent de 85, 2 550 et 8 500 m^3 d'oxygène gazeux.

2° **Un groupe de réchauffage** qui assure la vaporisation de l'oxygène en le réchauffant soit par eau froide ou eau chaude, soit par vapeur ou électricité, selon l'importance des débits.

3° **Une armoire** renfermant les accessoires de contrôle et de sécurité permettant d'adapter automatiquement le débit d'oxygène gazeux correspondant au besoin de l'utilisateur.

RAVITAILLEMENT PAR OXYDUC

Dans les grands centres industriels, certains ateliers ou chantiers navals reçoivent l'*oxygène gazeux* par une canalisation ***(oxyduc)*** directement reliée à l'usine productrice. C'est, du point de vue technique, la solution la plus parfaite, l'utilisateur reçoit l'oxygène à une vanne comme on reçoit l'eau à un robinet.

Le producteur stocke l'*oxygène liquide* dans un tank (de 20 000 à 850 000 litres, soit l'équivalent de 17 000 à 700 000 m^3 d'oxygène gazeux) aux heures creuses et fait des prélèvements sur celui-ci aux heures de pointes.

LE CARBURE DE CALCIUM

C'est lui qui fournit l'***acétylène*** (1) par réaction avec l'eau, en donnant pour résidu de la ***chaux éteinte.***

Sa formule chimique est ***Ca C2.*** Il est fabriqué dans des fours à arc électrique (3 000 à 3 500 °C) en partant d'un mélange de ***chaux*** (56 parties, 900 *kg*) et de ***coke*** (36 parties, 580 *kg*). Après obtention, il est coulé, concassé et classé suivant la grosseur de ses morceaux.

Les normes exigent un rendement minimal de 280 litres d'acétylène par kilogramme de carbure.

Le carbure de calcium est généralement livré en fûts métalliques de 74 *kg* (70 *kg* de $Ca\ C_2$ et 4 *kg* de fût).

AFIN D'ÉVITER DE GRAVES ACCIDENTS

provoqués par l'explosion du mélange air-acétylène, il faut se conformer aux recommandations suivantes:

— Les fûts contenant du carbure de calcium doivent être conservés ***à l'abri de l'humidité, dans des locaux aérés où il est interdit de fumer.***

— ***L'ouverture des fûts doit se faire avec un outil en laiton ou laitonné ou en Au 4G*** afin d'éviter les étincelles qui provoqueraient l'inflammation du mélange acétylène et air pouvant se trouver à l'intérieur.

— ***Les fûts doivent être vidés totalement de leur contenu y compris les poussières.***

L'ACÉTYLÈNE

C'est un carbure d'hydrogène dont la formule chimique est ***C2H2.*** Il contient 92,3 % de *C* et 7,7 % d'*H*. A la température de 15 °*C*, un litre d'acétylène a une masse de 1,11 *g*.

C'est un gaz incolore dont l'odeur désagréable est due aux impuretés qu'il contient. Il n'est pas toxique.

Il est soluble dans un grand nombre de liquides: sous la pression atmosphérique ***à la température de 15*** °C, ***l'acétone en dissout 25 fois son volume.*** Sous la pression de 10 atmosphères, 1 litre d'acétone dissout 250 litres d'acétylène.

(1) Le premier atelier de production d'acétylène par *cracking du méthane* a été installé en France en 1959. Plus récemment a démarré une nouvelle unité à partir du *gaz de Lacq*.

Chauffé à une température supérieure à 120 °C, l'acétylène se ***polymérise*** (1) en donnant des mélanges d'hydrocarbures. Cette température de 120 °C ne doit donc jamais être atteinte dans aucun appareil à acétylène.

L'acétylène est un composé instable: sous une pression supérieure à 1,5 *bar*, l'acétylène gazeux peut se décomposer brusquement en ses éléments (carbone et hydrogène), avec explosion et grand dégagement de chaleur.

Les mélanges acétylène-air et surtout acétylène-oxygène sont explosifs.

FABRICATION ET ÉPURATION DE L'ACÉTYLÈNE

L'acétylène est fabriqué dans des ***générateurs*** soit par les ateliers qui l'utilisent, soit industriellement pour être livré en bouteilles.

A sa sortie du générateur, l'acétylène contient des impuretés dont les plus importantes sont l'*hydrogène sulfuré* et surtout l'*hydrogène phosphoré.*

Il est indispensable d'éliminer l'hydrogène sulfuré et l'hydrogène phosphoré pour éviter que le *soufre* et le *phosphore* qu'ils contiennent ne se fixent dans l'acier, sous l'influence de la haute température et augmentent ainsi la fragilité de la soudure.

On épure l'acétylène en lui faisant traverser une matière oxydant ses impuretés (fig. 4).

La matière épurante utilisée actuellement, nommée ***catalysol,*** est à base d'*oxychlorure ferrique*, elle est livrée sous forme de poudre jaune.

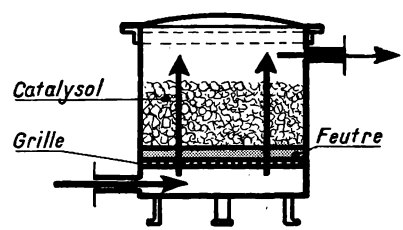


Fig. 4

Le catalysol présente l'avantage d'être régénérable plusieurs fois après épuisement par simple oxydation lente à l'air libre.

REMARQUES. — On se rend compte de la nécessité de régénérer la matière épurante en présentant à la sortie du chalumeau, dont l'acétylène est seul ouvert et non allumé, un morceau de papier buvard imbibé d'une solution de *nitrate d'argent* (5 à 10 %); si l'épuration est parfaite, le papier ne noircit pas, il noircit d'autant plus rapidement que l'épuration est moins complète.

(1) Une substance A est dite *polymère* d'une autre substance B, dite *monomère*, lorsque la masse moléculaire de A est un multiple entier de celle de B. Par exemple, le benzène $C_6 H_6 = 78$ est un polymère de l'acétylène $C_2 H_2 = 26$

ACÉTYLÈNE DISSOUS

Il serait dangereux (risques d'explosion) de comprimer l'acétylène au-dessus d'une pression de 1 *bar*; mais à l'état dissous, ce gaz peut supporter sans danger une pression de 20 *bars*.

Pratiquement, on transporte l'acétylène dissous dans des bouteilles en acier ou en alliages légers, contenant une *matière poreuse* (1) *imprégnée d'acétone*.

L'acétylène, après avoir été épuré parfaitement et desséché par plusieurs épurateurs et dessiccateurs, est dirigé par des compresseurs à marche lente, dans les bouteilles où il est dissous progressivement jusqu'à ce que la pression atteigne 15 *bars*, maximum fixé par les règlements.

Les bouteilles à acétylène dissous sont en acier étiré, ou embouties ou soudées; elles sont soumises à l'épreuve hydraulique à la pression de 60 *bars*.

Les bouteilles d'acétylène sont de forme semblable à celles d'oxygène mais, pour les différencier de ces dernières, la valve est en acier et le système de fermeture est constitué par un *pointeau à tête carrée* que l'on manœuvre à l'aide d'une clé spéciale. L'ogive est peinte en marron clair.

Les bouteilles les plus courantes contiennent, sous pression de 15 *bars*, 4 m^3 de gaz mesuré détendu à la température de 15 °C. Elles ont une masse approximative de 60 *kg*.

La quantité d'acétylène contenue dans une bouteille s'obtient par pesée, et non d'après la pression indiquée au manomètre car cette dernière varie dans de grandes proportions avec la température (ex. : 20 *bars* à + 30 °C et 10 *bars* à — 5 °C), elle dépend aussi de la qualité de la matière poreuse, de la quantité et de la qualité de l'acétone, etc.

On soustrait la tare (indiquée sur l'ogive) de la masse totale; il est ensuite facile d'obtenir le volume sachant que le mètre cube d'acétylène a une masse de 1,11 *kg*.

REMARQUES. — 1° On ne doit pas demander à une bouteille d'acétylène dissous de 4 000 litres un débit horaire supérieur à 1 000 l. Pour obtenir un débit plus important, il faut accoupler plusieurs bouteilles en s'assurant qu'elles ont une pression identique afin d'éviter des déplacements d'acétone d'une bouteille dans une autre.

2° Il existe des centrales de détente d'acétylène dissous semblables aux centrales d'oxygène.

(1) Pâtes à base de ciment, de charbon de bois, d'amiante, etc. — Charbon de bois en grains. Bourre de soie. Kapok. L'une des meilleures est la cellulose (de pins ou de peuplier) qui doit être bien tassée dans la bouteille.

POUR MAINTENIR LES BOUTEILLES EN BON ÉTAT ET ÉVITER LES ACCIDENTS, il faut:

— *éviter les chocs sur les bouteilles pleines ou vides;*

— *ne jamais entreposer ou utiliser les bouteilles à proximité d'une source de chaleur;*

— *ne jamais transvaser l'acétylène d'une bouteille dans une autre;*

— *mettre le chapeau de protection sur les bouteilles vides;*

— *en cas d'inflammation du gaz au robinet ou au détendeur, fermer immédiatement la bouteille;* si cela est impossible, éloigner la bouteille d'oxygène s'il y en a une à proximité et utiliser un extincteur à acide carbonique.

Les générateurs d'acétylène

Les générateurs d'acétylène sont conçus non seulement pour *produire* de l'acétylène par action de l'eau sur le carbure de calcium mais aussi pour *emmagasiner* le gaz produit en surplus soit en cours d'utilisation soit pendant les arrêts d'utilisation. Néanmoins dans les installations de grand débit il y a intérêt à emmagasiner l'acétylène dans un gazomètre séparé d'où il est dirigé vers les postes d'utilisation.

UN GÉNÉRATEUR D'ACÉTYLÈNE EST CARACTÉRISÉ PAR :

a) le mode d'attaque du carbure.

b) la pression maximale du gaz emmagasiné: basse pression jusqu'à 0,025 *bar;* moyenne pression, comprise entre 0,025 et 0,5 *bar;* haute pression de 0,5 à 1,5 *bar.*

c) sa maniabilité: fixe ou transportable ;

d) son régime de fonctionnement: continu ou discontinu.

e) son mode d'alimentation en carbure: manuel ou automatique ;

f) sa charge en carbure de calcium :

g) sa production horaire: réduite jusqu'à 3000 *litres;* moyenne de 3 000 à 15 000 *l* ; grande, au-dessus de 15 000 *l;*

h) l'état de la chaux résiduaire : très diluée, pâteuse, sèche.

D'APRÈS LE MODE D'ATTAQUE DU CARBURE ON PEUT CLASSER LES GÉNÉRATEURS EN QUATRE TYPES

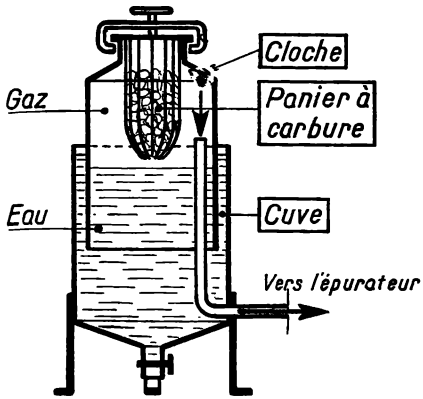


Fig. 5

Appareil à contact à basse pression.

Le contact du carbure de calcium avec l'eau produit de l'acétylène qui fait monter la cloche et provoque la séparation du carbure et de l'eau. Lorsque l'acétylène emmagasiné dans la cloche diminue, la pression baisse, la cloche descend et le carbure entre de nouveau en contact avec l'eau.

1° **Type à contact** (fig. 5) dans lequel le carbure, placé dans un panier à claire-voie, est mis en contact avec l'eau lorsque l'acétylène s'épuise dans le gazomètre.

On construit sur ce type les appareils transportables à basse, moyenne ou haute pression et aussi les appareils fixes à haute pression.

La chaux résiduaire est très diluée.

2° **Type à chute d'eau sur le carbure** (fig. 6). Ce sont des appareils à basse pression. L'eau s'écoule automatiquement et par quantité déterminée dans le récipient (tiroir) à carbure.

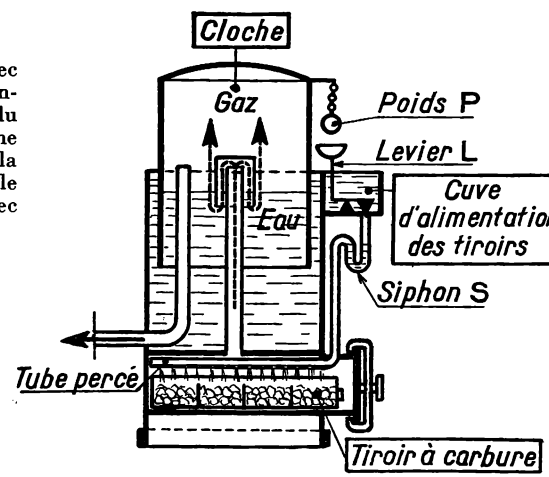


Fig. 6

Lorsque la pression d'acétylène diminue, la cloche descend, le poids P actionne le levier L qui laisse l'eau s'écouler dans le siphon S. Après production de gaz, la cloche monte, le poids libère le levier qui ferme l'orifice d'admission de l'eau dans le siphon.

Ce type de générateur était très répandu dans les petites et moyennes installations car il est simple et d'un bon rendement. Le modèle fixe à plusieurs tiroirs est à marche continue. Le modèle à un seul tiroir, donc à marche discontinue, peut être transportable.

La chaux résiduaire contenue dans les tiroirs est à l'état pâteux et facile à évacuer.

3° **Type à chute de carbure dans l'eau :** il donne de l'acétylène à basse pression.

La chute de carbure peut être manuelle ou automatique, dans ce dernier cas le carbure est placé dans des godets (fig. 7).

Ces appareils sont employés dans les installations importantes où la production doit être continue. Ils donnent de la chaux résiduaire liquide qui doit être évacuée dans des fosses de décantation (fig. 8).

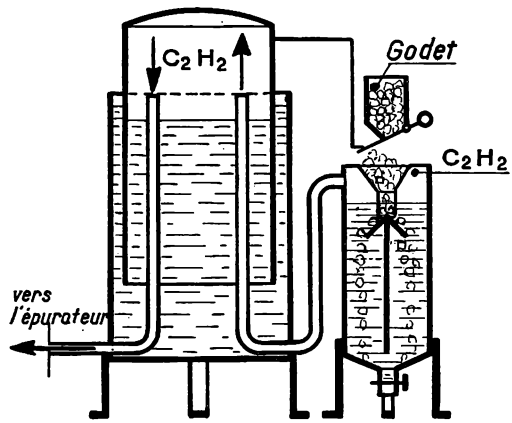


Fig. 7

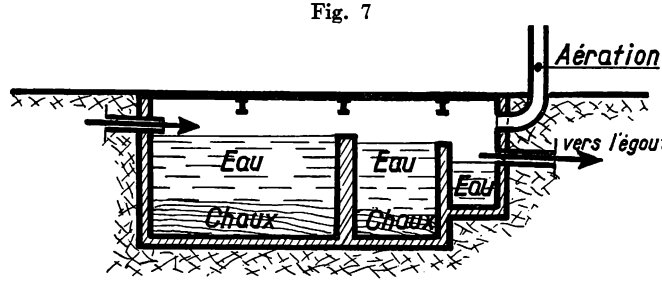


Fig. 8

4° **Type à immersion.**

Pour les très grandes productions, on utilise des *générateurs du type « à fûts entiers »* de carbure. Ils sont composés d'une cuve d'eau dans laquelle les fûts de carbure, fermés par un obturateur spécial, sont descendus puis débouchés.

Les générateurs à fûts nécessitent un gazomètre de grande capacité: 25 m^3 pour le modèle avec fûts de 70 *kg*; 40 m^3 pour le modèle avec fûts de 110 *kg*.

LES GÉNÉRATEURS A HAUTE PRESSION

Ce sont des appareils à contact. Ils se différencient des appareils à basse ou à moyenne pression par le fait qu'*ils sont entièrement clos* (fig. 9 et 10). Ils sont obligatoirement munis d'*une soupape de décharge* qui assure l'évacuation de l'acétylène lorsque la pression de ce gaz atteint 1,5 *bar*.

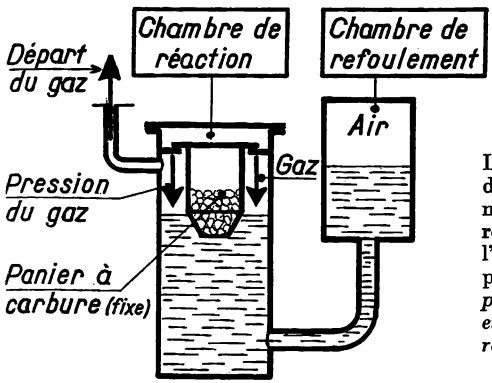


Fig. 9

Principe des générateurs à haute pression.

Le carbure de calcium situé à la partie inférieure du panier est immergé, il se produit un dégagement de C_2H_2. L'augmentation de pression qui résulte de la production de C_2H_2 fait remonter l'eau dans la chambre de refoulement et y comprime l'air contenu. *Il y a équilibre entre la pression de l'air dans la chambre de refoulement et la pression de l'acétylène dans la chambre de réaction.* Chaque variation de ces pressions amène un déplacement de la masse d'eau.

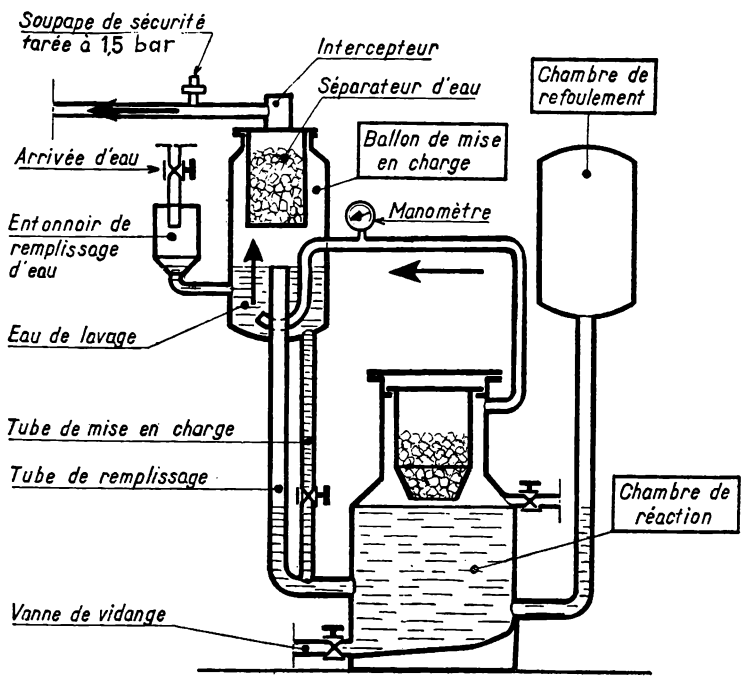


Fig. 10

Schéma de fonctionnement d'un générateur Pyrogène.

La première mise en contact du carbure avec l'eau (descente du panier) s'effectue de l'extérieur après fermeture de l'appareil.

Ils possèdent également:

— un ***manomètre*** qui indique la pression dans la chambre de réaction;

— un ***interrupteur*** qui empêche le reflux du gaz quand on met le générateur à l'air libre pour le recharger ;

— des dispositifs de nettoyage du gaz: ***laveur*** dans l'eau duquel l'acétylène abandonne ses poussières de chaux; ***séparateur d'eau*** constitué par de la pierre ponce ou des cailloux de rivière;

— un ***régulateur de pression*** muni d'un manomètre pour assurer un débit d'acétylène à une pression constante.

Épuration de l'acétylène. — Nous avons vu qu'à la sortie du générateur, l'acétylène contient des impuretés qu'il faut éliminer. A cet effet, chaque poste de production d'acétylène comporte au moins un ***épurateur*** (voir fig. 4).

INCIDENTS POUVANT SE PRODUIRE PENDANT LE FONCTIONNEMENT DES GÉNÉRATEURS D'ACÉTYLÈNE

Ce sont: *l'échauffement, la polymérisation et la surproduction.*

L'échauffement provient des phénomènes qui accompagnent la réaction du carbure avec l'eau. Si la température atteint 120 °C, l'acétylène se ***polymérise***, l'échauffement augmente et les risques d'explosion sont à craindre.

Les générateurs dans lesquels le carbure tombe dans un excès d'eau sont moins sujets à la polymérisation que les appareils à chute d'eau.

La surproduction est la quantité de gaz produite en excès sur la consommation, elle est normale lorsqu'elle peut être maintenue dans le gazomètre d'un générateur à basse pression ou dans la chambre de réaction d'un générateur à haute pression sous une pression inférieure à 1,5 *bar*. Si la production du gaz est supérieure à la contenance du gazomètre ou si la pression atteint 1,5 *bar* dans un poste à haute pression, le gaz en excès est rejeté automatiquement à l'extérieur.

CENTRALE DE PRODUCTION D'ACÉTYLÈNE A FONCTIONNEMENT CONTINU

Les ateliers qui font une consommation élevée d'acétylène utilisent fréquemment les postes à haute pression. Pris séparément, ceux-ci sont à marche discontinue car il faut les isoler de la canalisation de distribution pour les recharger après épuisement du carbure.

On obtient une centrale à marche continue par le branchement en parallèle de deux générateurs ou davantage, ce qui permet d'en avoir toujours au moins un en fonctionnement (fig. 11).

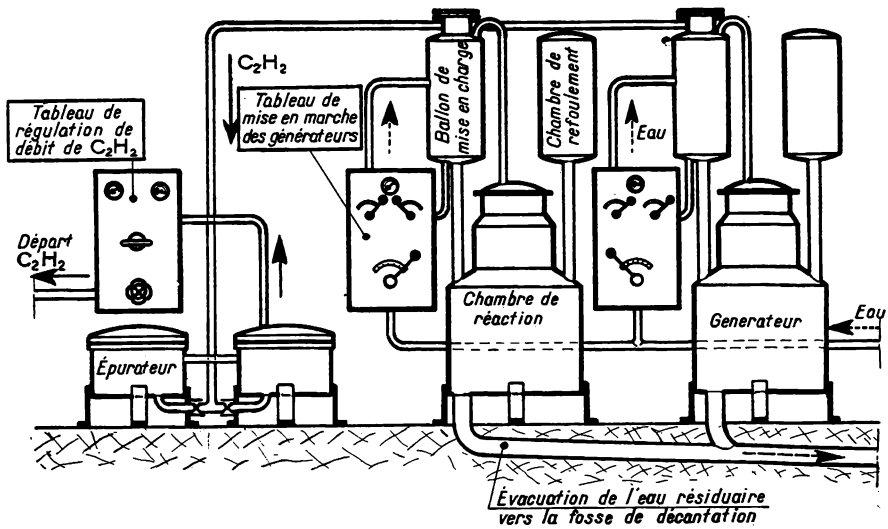


Fig. 11

Une autre solution consiste à produire du gaz dans un générateur à basse pression, ayant une production rapide, emmagasinée dans un gazomètre de bonnes dimensions, puis de ***surpresser*** ce gaz. On réalise ainsi une centrale de production d'acétylène à haute pression à fonctionnement automatique.

La figure 12 schématise le fonctionnement d'un appareil *Safasec* qui offre l'avantage de donner pour résidu de la *chaux sèche*, de faible volume, utilisable à la fabrication du mortier ou à l'amendement des terres.

Le surpresseur rotatif à palettes a un triple rôle :

1° il fournit du gaz à *haute pression* tout en conservant les avantages d'un générateur à *basse pression.*

2° il commande l'introduction de l'eau dans le générateur en exerçant une poussée sur la membrane du clapet F ;

3° il évite toute cause de *polymérisation* en abaissant la température interne par l'introduction d'une partie de gaz surpressé et refroidi.

La surpression de l'acétylène à partir d'un générateur à basse pression est pratiquée également dans les installations dites à **pressions égales,** *dans lesquelles l'oxygène et l'acétylène sont distribués sous des pressions rigoureusement égales* par l'intermédiaire de détendeurs spéciaux. Cette solution est excellente et assure un bon fonctionnement des chalumeaux.

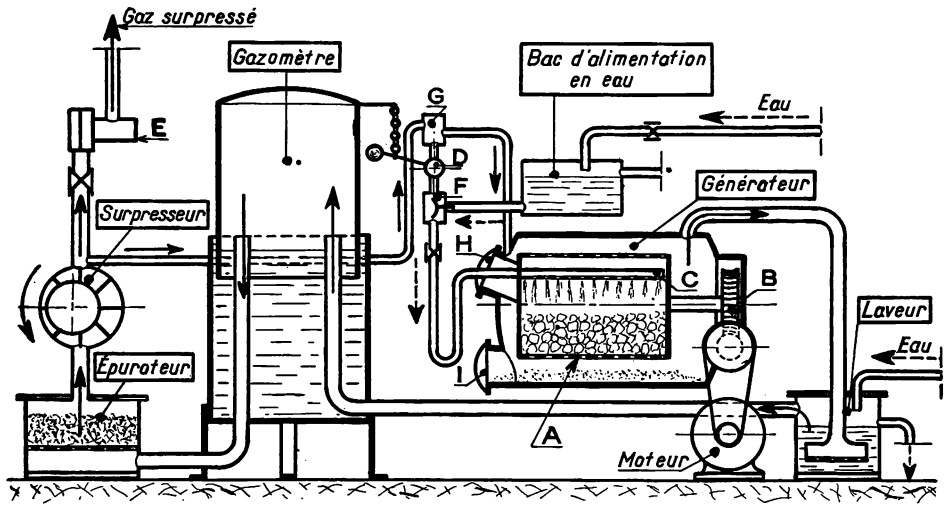


Fig. 12

Le carbure est contenu dans un **tambour perforé** *A* entraîné par un **réducteur de vitesse** *B*. Une **canne d'arrosage** *C* amène l'eau sur le carbure.

Le brassage continu du carbure débarrasse constamment sa surface de la chaux produite qui se dépose à la partie inférieure du générateur.

Quand la cloche du gazomètre descend, elle ouvre le robinet D qui provoque une introduction d'eau, il y a production de C_2H_2 et la cloche remonte.

L'acétylène traverse le **laveur-refroidisseur** à circulation d'eau puis il se rend au **gazomètre** ; après passage dans l'**épurateur** il est dirigé vers le **surpresseur.**

L'acétylène refoulé vers l'utilisation traverse l'interrupteur hydraulique E.

F clapet d'introduction d'eau dans le générateur.

G régulateur de pression.

H tampon de chargement du carbure.

I tampon de vidange de la chaux.

NOTA. — Le moteur commande à la fois le réducteur de vitesse et le surpresseur.

Canalisations d'acétylène. L'acétylène provenant d'un poste central de production est distribué à l'atelier par une canalisation fixe exécutée en tubes d'acier noir ou galvanisé peints havane (couleur normalisée) ; il est interdit d'utiliser les tubes de cuivre (danger de formation d'*acétylure de cuivre*, corps instable, pouvant provoquer des inflammations ou des explosions). Le diamètre des tubes est établi en fonction du débit maximal à prévoir et de la longueur de la canalisation.

Des parties basses munies d'un *bouchon de purge* sont prévues pour recevoir l'eau de condensation qui pourrait se trouver dans la canalisation.

L'étanchéité des joints se vérifie à l'eau savonneuse ***ne jamais employer de flamme.***

PRÉCAUTIONS DE SÉCURITÉ RELATIVES A L'INSTALLATION ET AU FONCTIONNEMENT DES GÉNÉRATEURS D'ACÉTYLÈNE

Les générateurs à grand débit et les centrales d'acétylène doivent être installés dans un ***local spécial, bien aéré*** et de façon que le rejet du gaz en surproduction se fasse *loin de l'atelier et de tout foyer incandescent.*

S'abstenir rigoureusement de fumer au voisinage des appareils.

Si un appareil est gelé, il faut le réchauffer à *l'eau chaude ou à la vapeur, à l'exclusion de tout autre moyen :* fer chaud, chalumeau, etc.

Si l'on doit effectuer, sur un générateur, une réparation nécessitant l'usage d'une flamme ou d'un fer à souder, il faut *évacuer complètement l'acétylène en remplissant au préalable l'appareil avec de l'eau.*

Les postes de soudage

Selon le mode d'alimentation en oxygène et en acétylène, ils peuvent être constitués de différentes façons. On distingue: les postes à basse pression, les postes à haute pression et les postes à pressions égales.

Les postes à basse pression comportent, en plus du générateur d'acétylène à basse pression et de son épurateur:

— une rampe de distribution d'acétylène, avec sa soupape de sûreté pour empêcher tout retour du mélange acétylène-oxygène dans la canalisation ;

— une bouteille d'oxygène avec son manodétendeur ou une rampe de distribution d'oxygène avec un détendeur.

— un chalumeau à basse pression ;

— deux tuyaux de caoutchouc qui amènent les gaz au chalumeau.

Les postes à haute pression sont alimentés en acétylène à haute pression soit par une bouteille d'acétylène dissous, soit par un générateur à haute pression, soit par un générateur à basse pression complété d'un surpresseur. Ils comprennent:

— une bouteille d'acétylène dissous avec son manodétendeur, ou une rampe de distribution d'acétylène avec un détendeur et une soupape de sûreté ;

— une bouteille d'oxygène avec son manodétendeur, ou une rampe de distribution d'oxygène avec un détendeur ;

— un chalumeau à haute ou à basse pression ;

— deux tuyaux de caoutchouc.

Les postes à pressions égales sont alimentés en acétylène surpressé, ils comprennent:

— un équilibreur de pression alimenté en acétylène et en oxygène à des pressions déjà voisines. C'est un appareil constitué par deux détendeurs réglables automatiquement pour des pressions de détente rigoureusement égales ;

— une prise double à robinets pour l'oxygène et l'acétylène ;

— un chalumeau à haute pression ;

— deux tuyaux de caoutchouc.

Les postes de soudure sont complétés, pour le soudage de petites pièces par une *table* en fer profilé, garnie à sa partie supérieure de briques réfractaires

Divers accessoires, dont nous verrons plus loin l'utilisation, sont à prévoir: un *économiseur* de gaz, un *seau* rempli d'eau, un *morceau de bois* tendre, une *carde*, une *aiguille* en laiton.

On peut faire également usage de chariots spéciaux pour le transport des bouteilles de gaz.

PROTECTION DES SOUDEURS

Les soudeurs doivent se protéger les yeux contre les radiations éblouissantes ou nocives de la lumière intense, contre la radiation de la chaleur et contre les projections de particules d'oxyde en fusion, par des lunettes spéciales.

Pour la soudure de l'acier on adopte les verres vert plus ou moins foncé selon la puissance de la flamme.

Pour l'exécution de certains travaux les soudeurs doivent porter des gants et un tablier, en cuir ou en amiante afin de protéger leurs mains et leurs vêtements.

Les soupapes de sûreté

Elles sont montées *obligatoirement* à l'extrémité de la rampe de distribution d'acétylène de chaque poste de soudure, chaque fois que ce gaz est fourni par un générateur.

Elles ont pour rôle d'empêcher le retour de l'oxygène (provoqué par une fausse manœuvre ou un mauvais fonctionnement du chalumeau) dans la canalisation d'acétylène. Le mélange explosif oxygène-acétylène serait très dangereux.

Pour la sécurité des postes à basse pression, on emploie indifféremment *les soupapes hydrauliques ou les soupapes sèches.*

LES SOUPAPES HYDRAULIQUES

Elles sont fournies généralement par le constructeur du générateur qui les règle à la pression de cet appareil.

Elles ne conviennent pas pour des pressions d'acétylène supérieures à 0,035 *bar.*

Les figures 13, 14 et 15 schématisent le fonctionnement d'une soupape hydraulique.

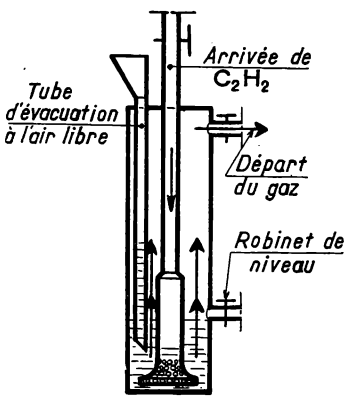


Fig. 13

Fonctionnement normal.

La colonne d'eau du tube d'évacuation fait équilibre à la pression de l'acétylène.

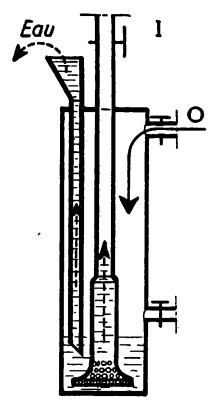


Fig. 14

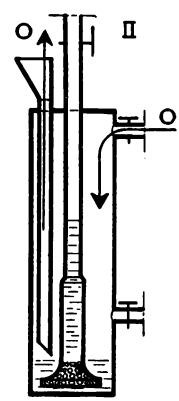


Fig. 15

Fonctionnement en cas de retour d'oxygène

I. La pression de l'oxygène fait monter l'eau dans le tube d'arrivée de l'acétylène. L'eau s'échappe par le tube d'évacuation.

II. L'eau s'oppose au passage de l'oxygène dans le tube d'arrivée. L'oxygène s'échappe par le tube d'évacuation.

Il faut contrôler journellement le niveau d'eau des soupapes :

1° verser de l'eau par l'entonnoir du tube de dégagement ;

2° ouvrir le robinet d'arrivée d'acétylène ;

3° ouvrir le robinet de jauge par lequel l'excès d'eau s'écoulera.

LES SOUPAPES SÈCHES

Elles peuvent se monter sur toutes les installations: à basse, moyenne ou haute pression.

PRINCIPE. — Un clapet en matière spéciale à base de caoutchouc, très léger, repose par simple gravité sur un siège métallique (fig. 16).

En fonctionnement normal, le clapet est soulevé par l'acétylène.

En cas de retour d'oxygène le clapet s'applique sur son siège d'autant plus fortement que la pression de l'oxygène est plus élevée, rendant ainsi impossible tout retour dans la canalisation.

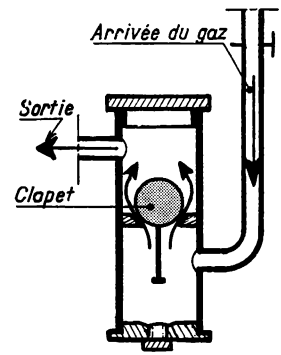


Fig. 16

Les soupapes sèches ne demandent pas d'entretien journalier mais il est bon, tous les deux ou trois mois, de dévisser le bouchon inférieur pour évacuer l'eau de condensation ainsi que les poussières qui auraient pu se déposer; on examine aussi le clapet après avoir dévissé le bouchon supérieur.

Les détendeurs

Pour exécuter une soudure il faut employer l'oxygène et l'acétylène à une pression bien déterminée et *constante quelle que soit la pression de ces gaz dans les bouteilles.* A cet effet, on monte sur les bouteilles d'acétylène dissous ainsi que sur les bouteilles d'oxygène un appareil nommé ***manodétendeur.*** (fig. 20).

En plus des organes assurant le réglage de la pression détendue, les manodétendeurs sont munis de deux manomètres; l'un dit de *haute pression* indique la pression du gaz dans la bouteille ; l'autre dit de *basse pression* indique la pression de débit.

Ils comportent également une soupape de sûreté et généralement un robinet de départ.

Les figures 17 et 18 schématisent deux types de manodétendeurs.

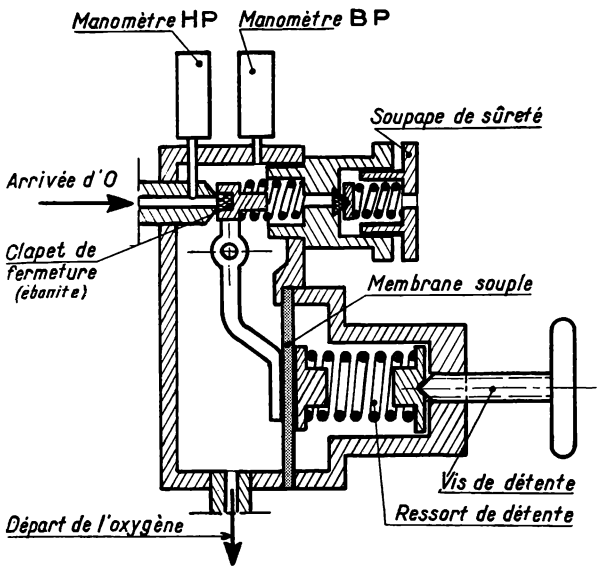


Fig. 17

Schéma d'un détendeur à obturateur dans la basse pression.

Manodétendeurs d'oxygène et manodétendeurs d'acétylène sont construits sur le même principe, seule la sensibilité des organes est différente.

Les manomètres d'oxygène sont gradués de 0 à 200 *bars* (haute pression) et de 0 à 20 *bars* (basse pression).

Les manomètres d'acétylène sont gradués de 0 à 20 *bars* (haute pression) et de 0 à 5 *bars* (basse pression).

MONTAGE DES MANODÉTENDEURS D'OXYGÈNE

Avant de monter le manodétendeur sur la bouteille d'oxygène, il faut purger la valve des poussières qu'elle peut contenir en l'ouvrant brusquement d'un quart de tour, et en la refermant immédiatement après.

Le manodétendeur d'oxygène se fixe sur la valve au moyen d'une queue de raccordement constituée par un tube fileté vissé dans un écrou à ailettes.

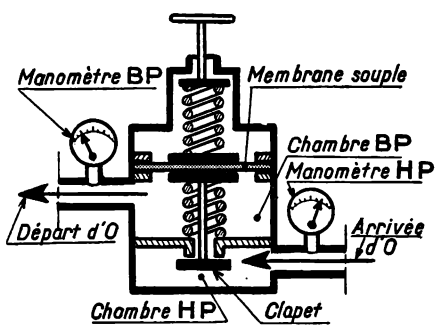


Fig. 18

Schéma d'un détendeur à obturateur dans la haute pression.

Après mise en place du manodétendeur, on s'assure qu'il ne se produit aucune fuite à la bouteille *en l'ouvrant lentement.*

Les grosses fuites sont audibles, les autres se découvrent à l'eau de savon ou avec une mèche d'amadou.

On supprime ordinairement les fuites au manodétendeur en serrant davantage celui-ci sur la valve. Si la fuite persiste, on peut intercaler entre la valve et la queue du détendeur une rondelle mince de plomb percée en son centre d'un trou de 2 à 3 *mm* de diamètre, mais il est préférable de faire usage de joints en plomb tout préparés (fig. 19).

Si une fuite se produit au volant de la valve, serrer l'écrou presse-étoupe.

REMARQUE IMPORTANTE. — Avant d'ouvrir la bouteille d'oxygène, il faut s'assurer que la vis de réglage est dévissée et le robinet de départ ouvert. Si la vis de réglage était serrée, on risquerait à l'ouverture de la bouteille, de provoquer un coup de bélier dans la chambre de détente et par là même de détériorer le manomètre indicateur de débit.

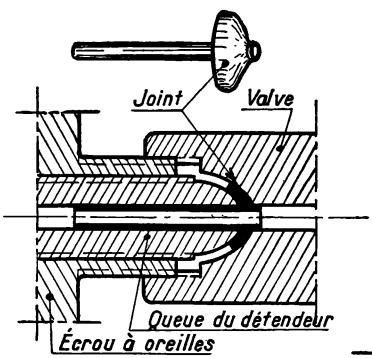


Fig. 19

Emploi de joint « le Presto ».

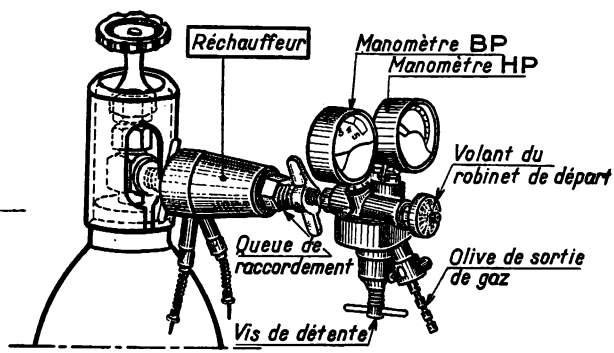


Fig. 20

GIVRAGE DES MANODÉTENDEURS D'OXYGÈNE

La détente de l'oxygène provenant des bouteilles abaisse la température dans le manodétendeur ; cet abaissement est d'autant plus important que le débit est grand.

Lorsque l'air ambiant ne réchauffe pas assez les détendeurs, la température des organes intérieurs de ceux-ci peut descendre au-dessous de zéro ^{0}C et la vapeur d'eau contenue dans l'oxygène produit le givrage des appareils.

Le givrage des manodétendeurs entraîne le déréglage du débit d'oxygène et, par conséquent, un mauvais fonctionnement du chalumeau.

Pour dégivrer un manomètre, il ne faut jamais se servir d'une flamme mais employer l'eau chaude ou un étrier chaud en acier.

Il est préférable de prévenir le givrage en montant un ***réchauffeur à résistance électrique*** entre le détendeur et la valve (fig. 20).

LES MANODÉTENDEURS A DOUBLE DÉTENTE

Ces appareils sont munis de deux mécanismes successifs de détente, qui ont pour effet de réduire les écarts de pression pour chacun d'eux. Le refroidissement est donc moindre et les appareils sont *ingivrables*. Ils fournissent en outre un débit à pression plus constante.

Ces qualités les font employer pour les travaux de précision, les soudures sur grosses épaisseurs et l'oxy-coupage.

MONTAGE DES MANODÉTENDEURS D'ACÉTYLÈNE DISSOUS

Le manodétendeur d'acétylène est fixé sur la bouteille par un étrier en fonte ou en acier qui immobilise la queue de raccordement dans l'orifice de départ de la valve ; le joint est assuré par une rondelle de cuir gras.

L'étanchéité du montage est vérifiée à l'eau de savon *à l'exclusion de toute flamme ou de tout corps porté au rouge.*

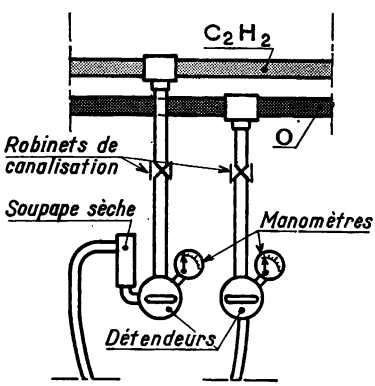


Fig. 21

En cas de fuite, il suffit généralement d'augmenter le serrage, ou, lorsque c'est nécessaire, de changer le joint de cuir.

Avant d'ouvrir la bouteille, procéder comme pour l'oxygène : vérifier que la vis de détente est desserrée et le robinet de départ ouvert.

Les postes de soudage desservis par des centrales d'oxygène et d'acétylène (ou par générateur) sont équipés uniquement de ***détendeurs*** fixés une fois pour toutes sur les rampes distributrices (fig. 21).

Les chalumeaux soudeurs

Le chalumeau soudeur est l'outil qui permet de réaliser le mélange du gaz combustible et du gaz comburant, en proportions et en pressions convenables pour obtenir une flamme à l'orifice de sortie.

Théoriquement, les chalumeaux devraient consommer l'oxygène et l'acétylène en volumes égaux. Pratiquement la consommation d'oxygène est égale à environ 1,1 ou 1,2 fois celle d'acétylène.

Les chalumeaux oxyacétyléniques sont rangés en deux types principaux d'après le régime de pression d'admission de l'acétylène : les chalumeaux à basse pression et les chalumeaux à haute pression.

REMARQUE. — Dans tous les chalumeaux oxyacétyléniques, la pression du mélange gazeux avant la sortie du chalumeau, doit être supérieure à 0,1 *bar* pour obtenir une vitesse de sortie suffisante afin d'éviter que le mélange oxygène-acétylène ne fasse explosion.

La puissance d'un chalumeau s'exprime par son débit horaire en litres d'acétylène. Ce débit est indiqué sur les buses.

LES CHALUMEAUX A BASSE PRESSION

Ce sont les plus employés, car ils peuvent fonctionner avec de l'acétylène à n'importe quelle pression (fig. 22).

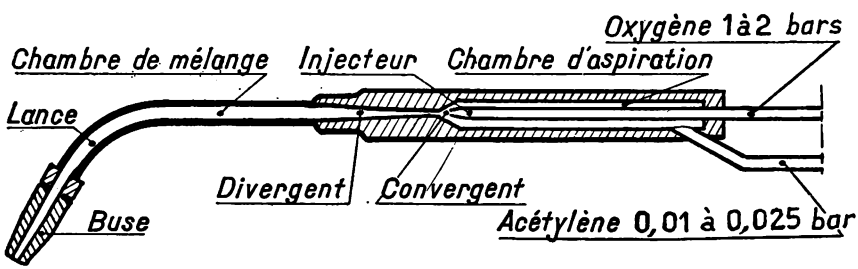


Fig. 22

L'oxygène, dont la pression est supérieure à 1 *bar* arrive par un ***injecteur*** central à l'entrée d'un ***convergent*** qui termine la ***chambre d'aspiration*** de l'acétylène. Une dépression se produit dans cette chambre, et l'acétylène est aspiré.

Les gaz brassés arrivent dans la ***chambre de mélange*** par un ***divergent.*** La chambre de mélange se termine par une ***buse*** à la sortie de laquelle se fait la combustion du mélange acétylène-oxygène.

Les chalumeaux à basse pression de ce type sont ***à débit fixe.*** Cependant, un même corps de chalumeau peut recevoir des *lances* différentes avec leur injecteur.

Les chalumeaux à débit fixe sont employés pour les travaux de série.

Dans les autres cas, on a intérêt à utiliser les chalumeaux à ***débit variable*** qui comportent un système de réglage de l'admission de l'oxygène par une aiguille

centrée dans l'*injecteur* (fig. 23). Un seul chalumeau peut ainsi, grâce à un jeu de buses, fournir une gamme de débits assez étendue.

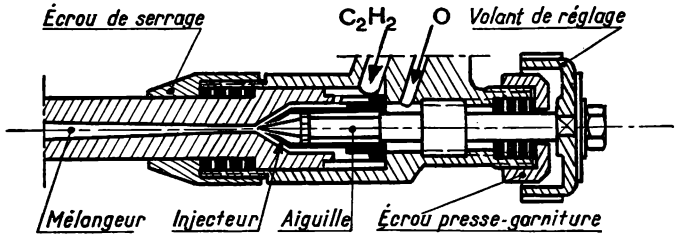


Fig. 23

Les chalumeaux sont désignés par un numéro, auquel correspond une gamme de débits indiquée sur le tableau ci-dessous:

Nos	Débits en litres d'acétylène/heure						
00	10	15	25	50	75	100	150
0	75	100	150	225	300		
1	100	150	225	350	500	750	1 000
2	1 000	1 500	2 000	2 500	3 000	3 500	4 000

LES CHALUMEAUX A HAUTE PRESSION

Dans les chalumeaux à haute pression *les deux gaz arrivent à la même pression :* 0,3 à 0,7 bar (fig. 24). L'injecteur est donc inutile et ces appareils sont très simples, légers, robustes et indéréglables. Mais ils ne peuvent être utilisés que lorsque l'acétylène est distribué à haute pression (acétylène dissous, surpressé, ou provenant d'un générateur à haute pression).

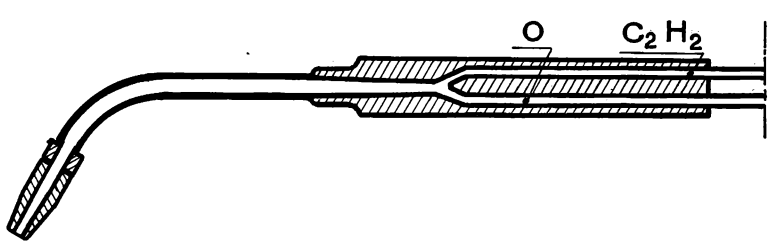


Fig. 24

Les chalumeaux à haute pression sont à débit variable par changement de buse et réglage aux détendeurs de la pression d'admission des gaz.

REMARQUE. — Les chalumeaux à basse pression, plus délicats que les chalumeaux à haute pression, ne devraient être employés que dans les seules installations où l'acétylène est fourni par un générateur à basse pression.

Les économiseurs

Ce sont des appareils qui se branchent sur les canalisations d'oxygène et d'acétylène avant les chalumeaux (fig. 25).

Ils ont pour but de supprimer les consommations de gaz pendant les temps morts (préparation des bords à souder, déplacement de pièces, martelage, etc.)

Il suffit d'accrocher le chalumeau à l'extrémité du levier à fourche pour obtenir son extinction. Le chalumeau se rallume, lorsque l'ayant décroché, on présente sa buse à la flamme de la veilleuse ; son réglage est exactement le même qu'avant extinction.

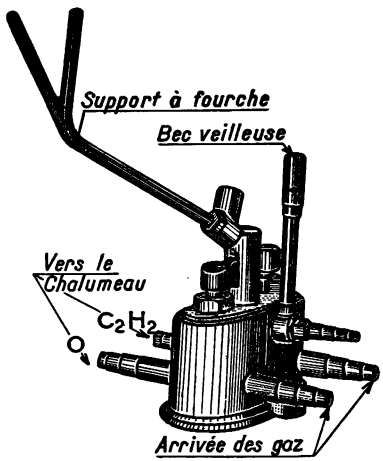


Fig. 25

Les tuyaux en caoutchouc

Les chalumeaux sont alimentés en oxygène et en acétylène par l'intermédiaire de tuyaux souples, en caoutchouc fortement entoilé.

Ces tuyaux, normalisés, se font en deux dimensions: 5/11 et 9/16, le premier nombre donne la dimension du diamètre intérieur en millimètres et le deuxième nombre la dimension extérieure ; ils se font également en deux teintes: ***rouge pour l'acétylène, gris noir pour l'oxygène.***

La fixation des tuyaux sur les chalumeaux, sur les détendeurs ou sur les autres appareils doit se faire sans fuite: il faut utiliser à cet effet des colliers de serrage spécialement préparés, et proscrire absolument l'usage de fils de fer, qui coupent les tuyaux. On vérifie leur étanchéité en les plongeant, sous pression, dans un récipient d'eau.

Pour raccorder deux tuyaux de diamètres égaux ou différents, il est recommandé d'employer des raccords spéciaux en laiton qui assurent une étanchéité absolue et permettent un montage facile et rapide.

Mise en marche des postes

1 — RÉGLAGE DE LA PRESSION DE DÉBIT DES GAZ

au moyen des détendeurs de rampe (gaz provenant de centrales de détente) ou des manodétendeurs (postes à acétylène dissous).

La pression d'acétylène pour un chalumeau basse pression est toujours très faible: 0,2 *bar* maximum; elle varie de 0,3 à 0,7 *bar* pour un chalumeau haute pression.

REMARQUE. — La canalisation d'acétylène des postes à basse pression ne possède pas de détendeur.

La pression d'oxygène est de l'ordre de 0,3 à 0,7 *bar* pour un chalumeau à haute pression et de 1 à 2 *bars* pour un chalumeau à basse pression.

2 — ALLUMAGE DU CHALUMEAU A BASSE PRESSION

ouvrir en grand le robinet d'acétylène du chalumeau et légèrement celui d'oxygène ; présenter l'extrémité de la buse à la flamme d'allumage.

REMARQUE. — Il est recommandé d'ouvrir le robinet d'admission de l'oxygène dès l'allumage pour éviter les fumerons abondants de la flamme sans oxygène.

3 — RÉGLAGE DE LA FLAMME

il consiste à doser de façon précise l'admission de l'acétylène et de l'oxygène au chalumeau afin d'obtenir un dard soudant qui ne présente ni excès d'acétylène ni excès d'oxygène.

On commence toujours par allumer le chalumeau avec défaut d'oxygène. On augmente ensuite le débit d'oxygène en ouvrant lentement le robinet du chalumeau, le dard apparaît de plus en plus nettement. Le réglage est correct au moment où le dard est débarrassé complètement de son halo. Si l'on continue d'augmenter le débit d'oxygène, le dard se réduit, devient pointu et la flamme est oxydante.

La flamme *oxydante* ou *carburante* (excès d'acétylène), ne permet pas, sauf dans quelques cas spéciaux, de réaliser de bonnes soudures.

En cours de travail, une flamme oxydante se reconnaît à ce qu'une mousse se produit sur le bain de fusion. Si des étincelles jaillissent de la soudure, la flamme est carburante.

Le soudeur doit maintenir la flamme constamment bien réglée.

INCIDENTS DE MARCHE

Si l'installation est correcte et les appareils d'utilisation en bon état, les incidents de marche sont rares et généralement localisés entre l'injecteur et la buse du chalumeau.

Les incidents qui peuvent se produire sont mis en évidence par des claquements du chalumeau :

— ***Le claquement sec,*** sans interruption de marche, provient d'une obstruction partielle de la buse par une particule d'oxyde qui se trouve chassée par le claquement lui-même.

— ***Les claquements répétés à intervalles plus ou moins longs*** sont provoqués par une pression d'oxygène trop basse (mauvais réglage du détendeur, ou bouteille qui se vide).

— ***Les claquements répétés à une cadence très rapide*** ont pour cause un échauffement excessif de la buse ; dans ce cas, il faut fermer immédiatement l'arrivée d'acétylène soit en fermant le robinet, soit en pliant le tuyau de caoutchouc à bloc, et refroidir le chalumeau en le plongeant dans un seau d'eau, le robinet d'oxygène restant ouvert pour empêcher l'eau d'entrer dans le chalumeau.

— Si, après un claquement, ***le chalumeau s'éteint et siffle,*** c'est qu'il y a combustion des gaz à l'intérieur de la lance jusqu'à l'injecteur. Il faut rapidement fermer l'arrivée des deux gaz pour arrêter toute combustion et refroidir le chalumeau comme il est indiqué ci-dessus.

— ***La buse peut être obstruée partiellement*** par de petites particules d'oxyde qui font dévier le dard tout en le réduisant. Il est souvent facile de nettoyer la buse en la présentant un court instant sur un morceau de bois tendre qui s'enflamme légèrement, puis en la frottant sur celui-ci. Au contact du bois, le chalumeau s'éteint et se rallume, il se produit une suite de petits claquements qui chassent l'oxyde de la buse.

S'il est impossible de décrasser ainsi la buse, il faut la démonter et la nettoyer à l'aide d'*une aiguille en laiton très allongée* (fig. 26).

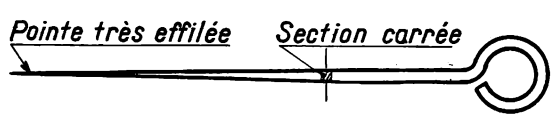


Fig. 26

Une étincelle ou la chute d'une pièce chaude peuvent provoquer la détérioration d'un des tuyaux, et la production d'une flamme: il faut alors fermer le robinet d'amenée du gaz dans cet organe. Si le caoutchouc brûle, c'est le tuyau d'oxygène qui a été atteint; si le caoutchouc ne brûle pas il s'agit du tuyau d'acétylène.

ARRÊT DES POSTES

Il est de courte ou de longue durée.

1 — **Arrêt de courte durée d'un poste démuni d'économiseur.**

a) *pour un poste à acétylène dissous* : fermer les robinets de départ des deux manodétendeurs. Détendeurs et chalumeau restent ainsi réglés.

b) *pour un poste à basse pression ou un poste alimenté par des centrales de détente* : fermer les deux robinets du chalumeau sans dérégler les détendeurs de rampe.

2 — **Arrêt de longue durée.**

Il ne doit pas rester la moindre quantité de gaz dans les manomètres, afin de mettre leurs organes de détente au repos.

Pour évacuer totalement les gaz :

1° fermer l'orifice d'arrivée de l'acétylène (robinet de la bouteille ou robinet d'arrivée à la soupape) afin d'éviter la formation de fumerons ;

2° fermer l'arrivée d'oxygène (valve de la bouteille ou robinet de rampe).

Durant ces deux manœuvres, laisser les robinets du chalumeau ouverts et de préférence, le chalumeau allumé ;

3° quand il ne reste plus de gaz, les aiguilles des manomètres sont à zéro; desserrer alors les vis de réglage des détendeurs et fermer le chalumeau.

ENTRETIEN DES CHALUMEAUX

Les chalumeaux sont des outils précis qui doivent toujours être maintenus en parfait état.

A la suite de plusieurs incidents de marche, notamment des combustions internes, les chalumeaux peuvent être encrassés. Il est souvent possible de les nettoyer par un jet d'oxygène sous pression ; celui-ci est introduit par la buse et sort par les raccords d'arrivée des deux gaz que l'on bouche alternativement avec un doigt pour nettoyer les deux canalisations.

Le chalumeau à basse pression peut aussi être décrassé par une solution étendue d'acide chlorhydrique aspirée par les raccords d'amenée de l'acétylène, l'oxygène étant ouvert. Il faut ensuite rincer parfaitement le chalumeau par aspiration d'eau.

S'il est nécessaire de réparer un organe essentiel tel que l'injecteur, il faut confier la réparation au constructeur et non au soudeur.

Les buses doivent être nettoyées fréquemment à l'extérieur avec une carde et périodiquement à l'intérieur avec une aiguille en laiton ou en cuivre. Il ne faut jamais utiliser une aiguille en acier qui modifierait l'alésage de la buse et surtout ne jamais faire ce travail de l'extérieur (fig. 27 et 28).

Enfin, comme pour les détendeurs, ***ne jamais huiler ou graisser l'intérieur des chalumeaux.***

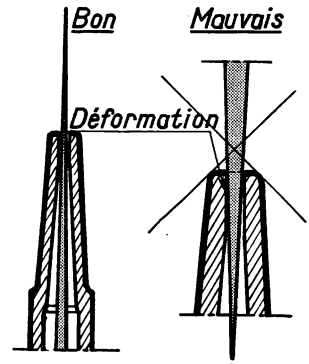


Fig. 27 Fig. 28

La pratique du soudage

Pour exécuter des soudures offrant toutes garanties de sécurité, il faut tenir compte de plusieurs facteurs dont chacun doit être étudié avec soin. En premier lieu, il faut déterminer l'emplacement des lignes de soudure et la méthode de soudage les plus convenables aux points de vue *résistance de la soudure, déformations à éviter, vitesse d'exécution* et *prix de revient.*

EMPLACEMENT DES SOUDURES

Il est souvent d'une importance capitale, car de son choix dépendent en grande partie la nature et la valeur des efforts auxquels les soudures seront soumises.

La position des cordons de soudure est déterminée par: *a*) le prix de revient; *b*) la résistance aux efforts ; *c*) les tensions créées dans les cordons de soudure.

Prix de revient. — Il est fonction de la méthode de soudure, mais aussi de la facilité avec laquelle celle-ci est exécutée. A résistance égale, choisir l'emplacement donnant le cordon le plus court.

Résistance aux efforts. — La soudure doit être exécutée à l'emplacement où les sollicitations aux efforts sont les plus faibles. Il faut éviter que les soudures aient à subir des contraintes de flexion, et préférer les efforts de traction, de compression ou de cisaillement.

Tensions. — La soudure autogène étant exécutée à haute température, elle donne toujours naissance à des phénomènes de ***dilatation*** et de ***contraction*** (*retrait*) qui déterminent des *tensions internes, des déformations ou des cassures.*

La méthode de soudage détermine, en fonction de l'épaisseur du métal.

a) la préparation des lignes de soudure ;
b) la puissance du chalumeau ;
c) le diamètre de la baguette de métal d'apport ;
d) la position et les mouvements du chalumeau et du métal d'apport.

PRÉPARATION DES BORDS A SOUDER

Elle varie avec le mode opératoire. Les bords sont situés dans le même plan bout à bout où ils forment entre eux un angle.

1 — **Soudures bout à bout.**

La préparation la plus simple est celle qui ne nécessite aucun usinage des bords (fig. 29). On laisse généralement les bords écartés l'un de l'autre d'une demi-épaisseur de tôle.

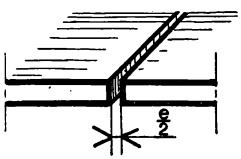


Fig. 29

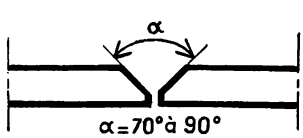


Fig. 30

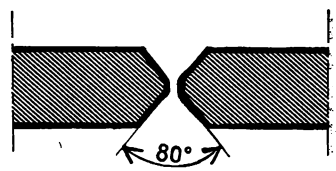


Fig. 31

Ne pas chanfreiner sur toute l'épaisseur pour ne pas brûler les arêtes.

Les tôles épaisses sont chanfreinées afin d'obtenir une bonne pénétration de la soudure. Le chanfrein est simple (fig. 30) ou double (fig. 31).

La soudure des tôles très minces ($e < 1$ *mm*) est facilitée par la façon d'un bord étroit qui raidit les tôles et constitue le métal d'apport (fig. 32). Cette disposition est également adoptée pour la soudure d'éléments de coudes (méthode plus rapide que l'agrafage) et de fonds ($e < 3$ *mm*) n'ayant à résister qu'à de très faibles efforts (fig. 33).

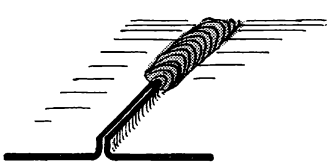


Fig. 32

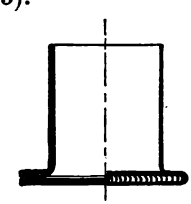


Fig. 33

Fig. 34

Lorsque les tôles à assembler sont d'épaisseurs différentes la préparation la plus simple est celle indiquée par la figure 34 à condition que la différence d'épaisseur ne soit pas trop grande et que la pièce soit accessible sur ses deux faces.

Si deux faces doivent se trouver dans le même plan (collecteur de chaudière par exemple), le bord le plus épais est aminci progressivement pour le ramener à la même épaisseur que l'autre (fig. 35). Quand les deux épaisseurs sont très différentes on adopte l'une des dispositions représentées par la figure 36.

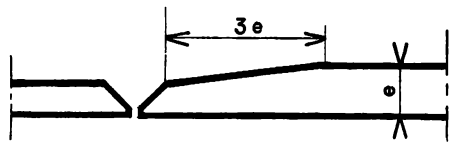


Fig. 35

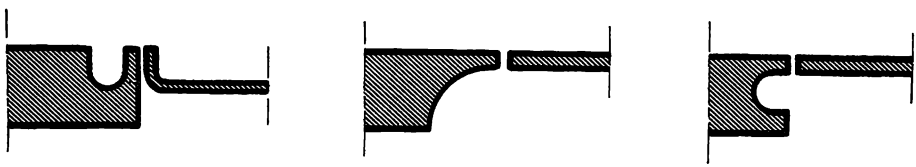


Fig. 36

2 — **Les soudures en angle** s'exécutent sans aucune préparation, qu'elles soient sur *angle intérieur* (fig. 37) ou sur *angle extérieur* (fig. 38).

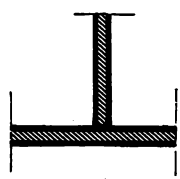


Fig. 37

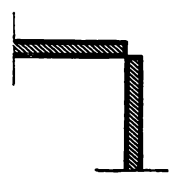


Fig. 38

La soudure est réalisée soit directement sur bords libres, soit après *pointage* des bords c'est-à-dire après avoir exécuté de place en place des soudures très courtes.

Chaque fois que c'est possible (pièces suffisamment rigides, emploi de montages appropriés) il y a intérêt à exécuter la soudure sur bords libres, convenablement guidés de façon que les bords soient toujours dans le même plan et en contact au moment de la fusion. Les déformations après soudage sont, par ce procédé, beaucoup moins importantes que lorsque les bords sont préalablement pointés.

Exécution du pointage : les points se font aussi petits que possible, sans ou avec le minimum de métal d'apport. Les tôles chanfreinées sont pointées sur la face opposée au chanfrein quand celle-ci est accessible.

Le pointage commence vers le milieu de la ligne de soudure et se continue alternativement à gauche et à droite du premier point en dirigeant la flamme toujours vers la partie restant libre (fig. 39).

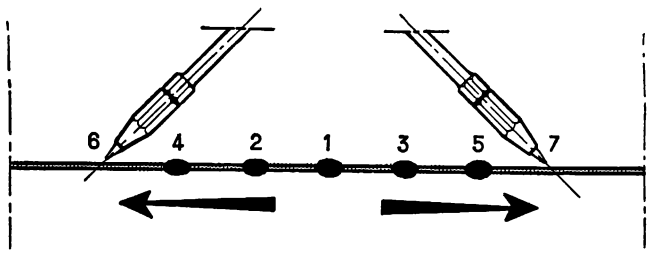


Fig. 39

Ordre d'exécution des points de soudure.
Ne pas incliner trop le chalumeau qui peut même être tenu perpendiculairement à la pièce pour bien localiser le chauffage.

L'écartement des points varie de 20 à 30 fois l'épaisseur des tôles.

CHOIX DU MÉTAL D'APPORT

Le bain de soudure est constitué par la fusion des bords à souder et par le métal d'apport.

Le bain de soudure doit être homogène, il y a donc intérêt à employer un métal d'apport de composition semblable à celle du métal lui-même. La première qualité d'un métal d'apport est la pureté (moins de 0,04 % de *S* et moins de 0,07% de *P*). Le dosage du carbone doit être connu, ainsi que celui d'autres éléments tels que silicium, manganèse, nickel, etc., ajoutés souvent pour améliorer les caractéristiques mécaniques de la soudure.

Le métal d'apport est livré en baguettes d'une longueur de un mètre et de diamètre de 1,5. 2. 2,5. 3. 4. 5. 6 *mm ;* il est également livré en couronne jusqu'à un diamètre de 4 *mm.*

MOUVEMENTS DU CHALUMEAU ET DE LA BAGUETTE

Sauf pour la réalisation des soudures horizontales sur plan vertical, ***le chalumeau n'est animé que d'un seul mouvement de translation régulière*** afin d'éviter le brassage du bain qui s'oxyderait au contact de l'air.

Le dard doit être maintenu légèrement au-dessus du métal fondu.

Chalumeau et baguette se déplacent toujours dans le plan contenant la soudure (fig. 40). Éviter de relever la flamme à tout moment.

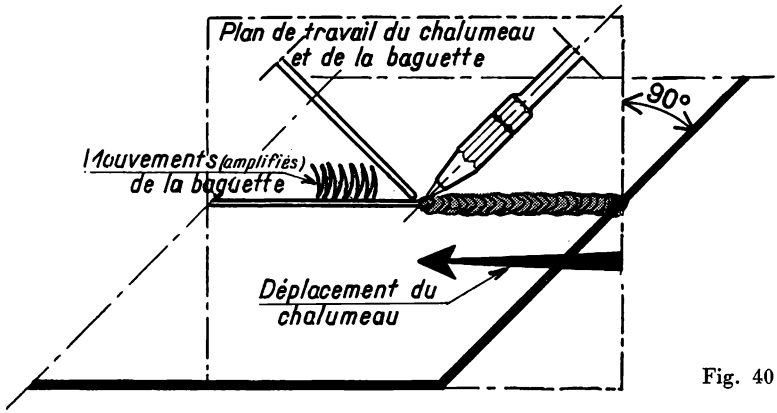


Fig. 40

La baguette de métal d'apport est animée de mouvements destinés à répartir régulièrement la soudure.

Fondu régulièrement, le métal d'apport doit toujours être maintenu dans la zone réductrice de la flamme.

Une soudure réalisée correctement (fusion totale des bords, aucun défaut) est d'autant meilleure qu'elle a été exécutée rapidement.

Notions sur la dilatation et le retrait en soudage autogène

Le retrait est équivalent et de sens contraire à la dilatation lorsque les pièces chauffées peuvent se dilater *librement* dans l'espace, mais en soudage autogène dilatation et retrait sont souvent contrariés dans leurs effets (fig. 41).

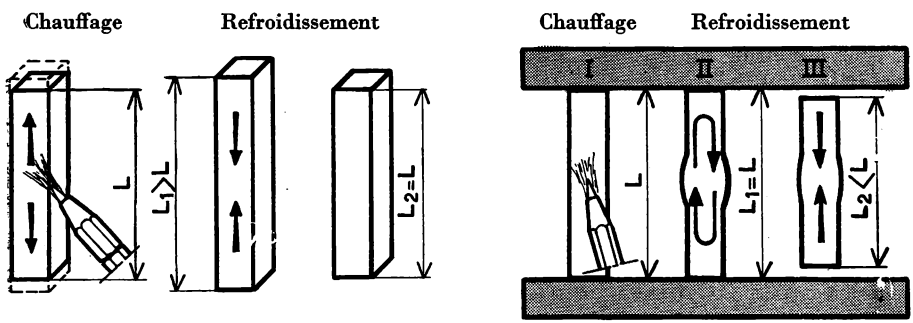


Fig. 41

Barreau libre

Le retrait s'exerce sur une longueur $L_1 > L$; après refroidissement $L_2 = L$.
REMARQUE. — Ceci n'est exact que si le barreau est chauffé de façon homogène sur toute sa longueur.

Barreau bridé

II. L'effort de dilatation est contrarié, il se retourne vers la partie rendue plastique par le chauffage. III. Le retrait s'exerce en tous sens, en partant d'une longueur $L_1 = L$; après refroidissement $L_2 < L$.

La dilatation en volume a nécessairement toujours lieu, généralement la dilatation est contrariée dans les sens longitudinal et transversal; il en résulte après refroidissement des raccourcissements dus au retrait, qui provoquent des ***déformations.***

Si, par leur nature même, les pièces offrent une certaine résistance une partie des déformations ne peut se produire, il y a naissance de ***tensions.***

Si le retrait est contrarié avec force, les tensions sont importantes et peuvent provoquer des ***cassures*** (fig. 42).

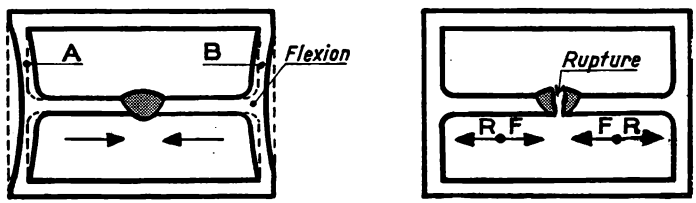


Fig. 42

1° **Métal tenace.**
Au retrait, il y a flexion des parties A et B (faible section) ou création de tensions internes considérables.

2° **Métal peu élastique (fonte)**
La réaction *R* empêche le retrait de s'effectuer normalement.
La partie soudée, encore chaude, offre peu de résistance et se rompt.

LE RETRAIT SE MANIFESTE DANS TOUS LES SENS: LONGUEUR, LARGEUR ET ÉPAISSEUR DE LA SOUDURE

Voici quelques exemples de déformations provoquées par le retrait dans le sens longitudinal.

a) ***soudure sur tôles planes de faible largeur:*** les bords *A* et *B* deviennent plus longs que la soudure, la tôle se voile (fig. 43).

b) ***la soudure d'un cylindre en tôle mince*** provoque la déformation indiquée par la figure 44.

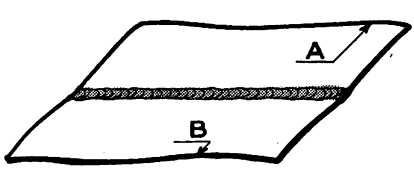


Fig. 43

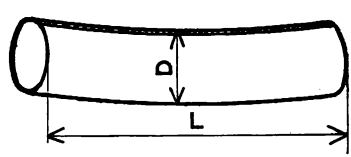


Fig. 44
Déformation possible seulement s le rapport $\frac{L}{D}$ est grand.

c) ***si l'on soude en angle extérieur*** le fond d'un récipient prismatique, les lignes de soudures se raccourcissent, les surfaces planes deviennent trop longues et se bossellent (fig. 45).

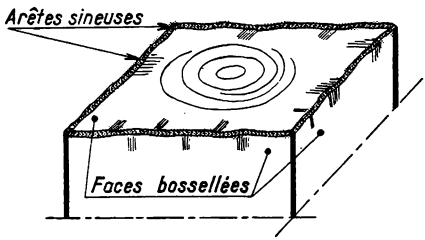


Fig. 45

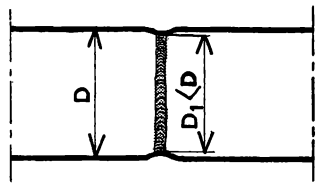


Fig. 46

d) ***la soudure bout à bout de deux viroles en tôle mince*** raccourcit le cercle et, corrélativement, le diamètre (fig. 46).

Voici quelques exemples de déformations provoquées par le retrait transversal :

a) ***sur tôle plane*** (fig. 47), la déformation est d'autant plus importante que les tôles sont plus épaisses.

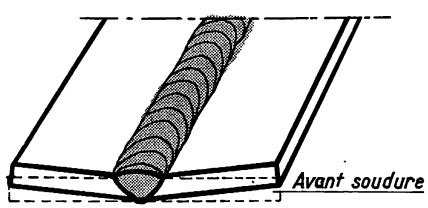


Fig. 47

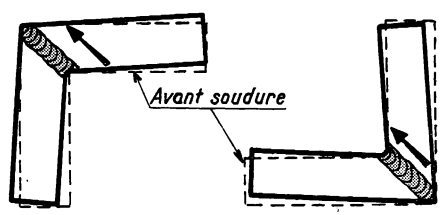


Fig. 48 Fig. 49

b) ***soudure de fers plats :*** selon le sens d'exécution de la soudure, l'angle des deux plats est plus *ouvert* (fig. 48) ou plus *fermé* (fig. 49), après qu'avant soudure ;

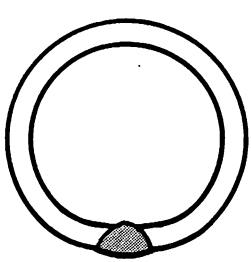


Fig 50

c) ***soudure de viroles sur tôles chanfreinées :*** le retrait des fibres extérieures est plus grand que celui des fibres intérieures, la virole s'aplatit (fig. 50).

Au contraire, si la tôle est mince et que le rapport du diamètre à l'épaisseur est grand, les extrémités de la virole se déforment comme l'indique la figure 51.

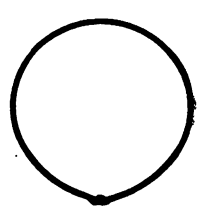


Fig. 51

d) ***soudure dans un angle arrondi:*** le rayon de l'arrondi augmente (fig. 52).

e) ***soudure en angle intérieur :*** l'*angle* α diminue (fig. 53).

f) ***soudure d'une tubulure sur un tube :*** le tube se cintre (fig. 54).

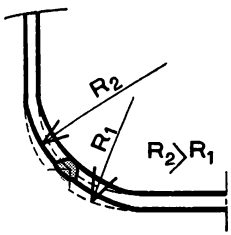


Fig. 52

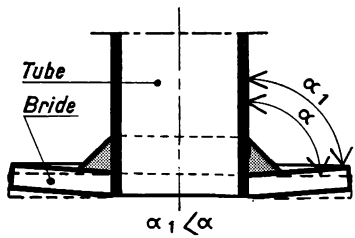


Fig. 53

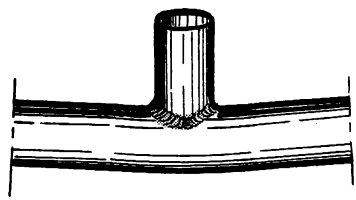


Fig. 54

APPLICATION DES DÉFORMATIONS PENDANT L'EXÉCUTION DE LA SOUDURE SUR BORDS LIBRES

Si l'on soude deux tôles sans pointage la *dilatation* écarte les deux bords mais ensuite le *retrait transversal* fait rapprocher les bords ; si on ne contrarie pas ce retrait, les bords finissent par se chevaucher, d'où la nécessité de maintenir toujours un écartement au moyen d'une pince de monteur (fig. 55).

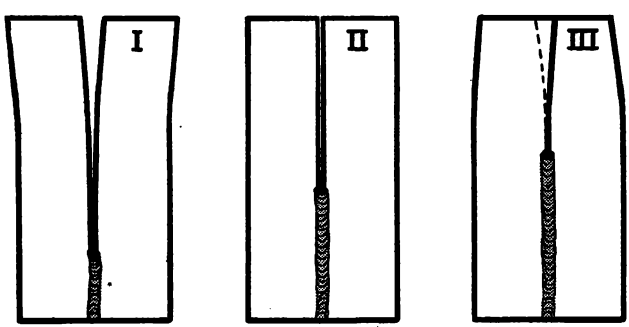


Fig. 55

Écartement — Rapprochement — Chevauchement

L'écartement des bords peut s'obtenir en chauffant chaque tôle aux points P et P_1 situés en avant de la soudure terminée. La *dilatation longitudinale des bords* les écarte suivant les flèches (fig. 56).

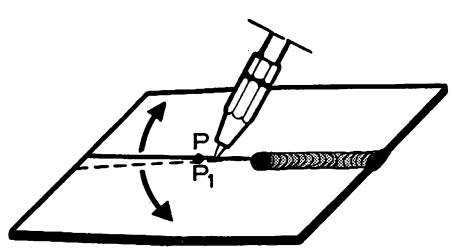


Fig. 56

Au contraire, si l'on veut rapprocher les bords, on chauffe la soudure en arrière du point terminal *M*. *La dilatation transversale* fera rapprocher les bords qui prennent appui en *M* (fig. 57).

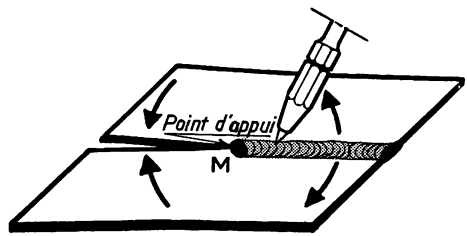


Fig. 57

NÉCESSITÉ D'EXÉCUTER UN TALON DE SOUDURE SUR BORDS POINTÉS

Si l'on commence la soudure à une extrémité de la tôle, il se produit une cassure qui se propage parfois sur toute la longueur de la soudure.

Cette cassure est due au *retrait transversal* qui s'exerce sur du métal encore *plastique* (fig. 58).

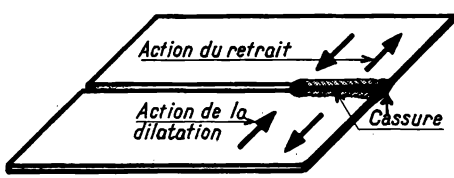


Fig. 58

Le métal, encore à haute température, est sollicité par des efforts contraires dus au retrait et à la dilatation.

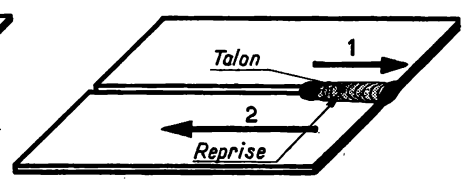


Fig. 59

Les flèches indiquent le sens et l'ordre d'exécution de la soudure.

On évite cette cassure en exécutant en premier lieu une courte soudure (5 à 10 *cm*) (fig. 59) qu'on appelle ***talon de soudure.*** On continue ensuite la soudure en partant un peu en arrière de l'origine du talon.

POUR ÉVITER LES DÉFORMATIONS DUES AU RETRAIT

ou, tout au moins, les atténuer, différents moyens sont employés.

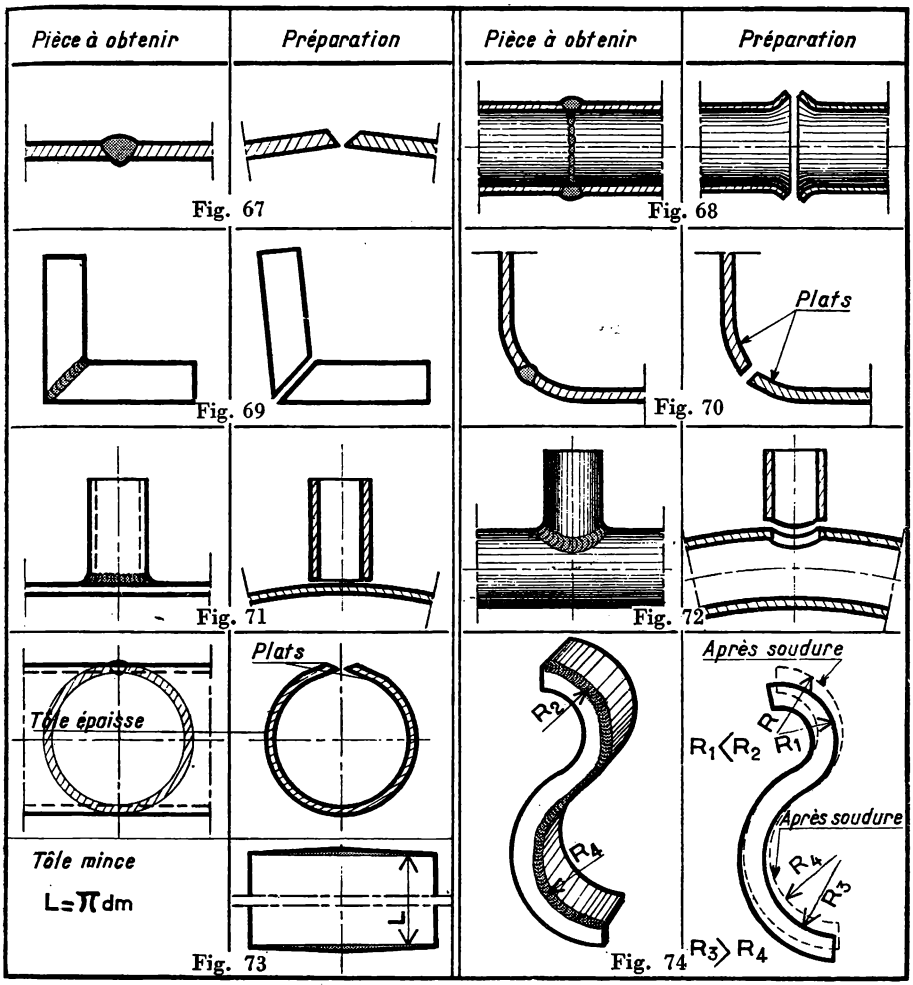


Fig. 67 à 74

Le développement du cylindre en tôle mince, représenté sur la figure 73, a pour but d'allonger la génératrice soudée. Après soudage, la génératrice est raccourcie, elle reste droite, le cylindre n'est pas cintré comme celui de la figure 44 ; le diamètre n'est pas augmenté.

1° ***Éviter de placer les soudures en angles*** impossibles à marteler, les remplacer par des soudures bout à bout (fig. 60 à 65). La figure 66 donne la disposition à adopter lorsqu'une virole pénètre dans un récipient.

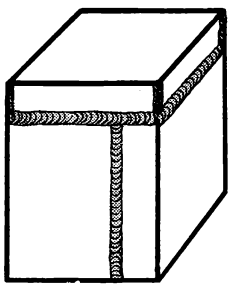


Fig. 60

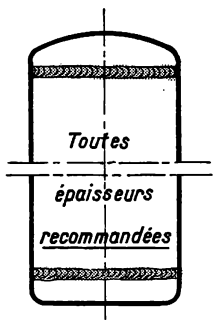


Fig. 61

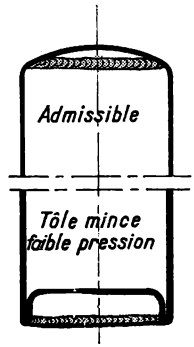


Fig. 62

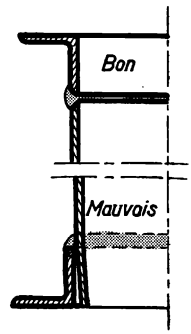


Fig. 63

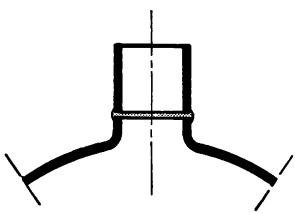


Fig. 64

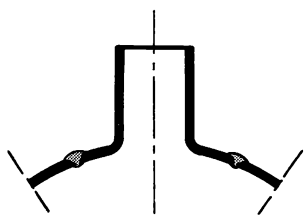


Fig. 65

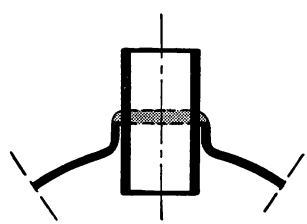


Fig. 66

2° ***Avant soudage, effectuer des déformations de sens contraire et de valeur sensiblement égale à celles que produira le retrait*** (fig. 67 à 74).

3° ***Préchauffer totalement ou partiellement la pièce :*** (fig. 75 et 76) : si la pièce est chauffée au rouge, la dilatation et le retrait se font librement puisque le métal est rendu *plastique* et que toutes les parties de la pièce se refroidissent ensemble.

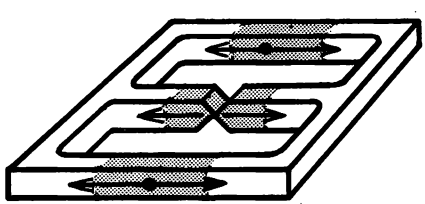


Fig. 75

I. Préchauffage partiel.
Les 3 barreaux se dilatent également.

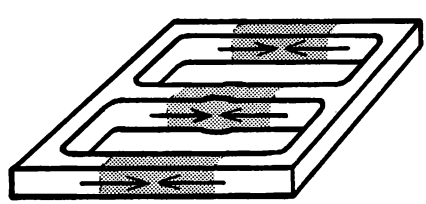


Fig. 76

II. Refroidissement.
Le retrait est sensiblement égal dans chaque barreau.

4° ***Neutraliser les effets du retrait*** en exécutant la soudure par *fractions opposées* (fig. 77).

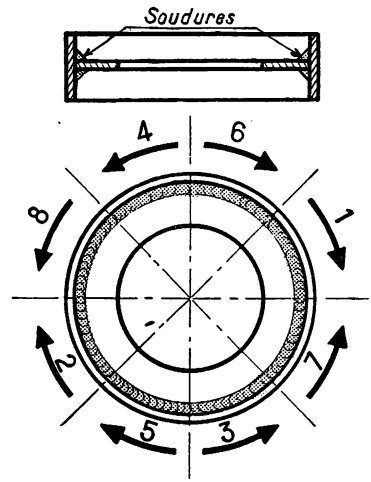


Fig. 77

POUR SUPPRIMER LES DÉFORMATIONS DUES AU RETRAIT ON PEUT :

1° ***Allonger la soudure*** en la martelant à froid, d'où nécessité de la placer dans un endroit très accessible.

2° ***Exécuter des chaudes de retrait.*** (1).

3° ***Redresser les pièces*** à froid ou à chaud au moyen de presses, de leviers, etc.

LES TENSIONS DUES AU RETRAIT DISPARAISSENT PAR MARTELAGE DE LA SOUDURE OU PAR RECUIT DE LA PIÈCE

1° Le martelage à chaud améliore la structure du métal (sauf certains métaux et alliages fragiles à chaud), mais la suppression des tensions ne se fait que lorsque le métal n'est plus plastique, c'est-à-dire à froid, en créant par compression des efforts inverses à ceux qui ont provoqué les tensions. ***Si le martelage est commencé à chaud il doit donc se poursuivre à froid.***

2° ***Recuit :*** la pièce est chauffée à une température à laquelle le métal est plastique ; les tensions sont alors annulées, il y a équilibre moléculaire. Le refroidissement se fait lentement.

L'acier au carbone est chauffé entre 625 et 650 °C pendant un temps calculé sur la base de 3 minutes par millimètre d'épaisseur. Ce n'est pas un recuit de normalisation ($A_3 + 50°$) mais un ***recuit de détensionnement*** ($t < A_3$.)

REMARQUE. — Le recuit est souvent précédé d'un martelage de la soudure.

Les méthodes de soudage et la préparation des bords à souder

Les méthodes de soudage peuvent se classer en trois groupes principaux:

— ***la soudure à gauche*** qui s'exécute de la droite vers la gauche ;

— ***la soudure à droite*** réalisée de la gauche vers la droite ;

(1) Voir tome I : dressage.

— ***la soudure montante à double cordon*** exécutée dans un plan vertical ; et en groupes secondaires dérivés des premiers :

— *soudure en angle intérieur*,

— *soudure en angle extérieur*,

— *soudure au plafond* (horizontale au-dessus de la tête du soudeur),

— soudure *en corniche* (horizontale dans un plan vertical).

LA SOUDURE A GAUCHE

C'est la plus courante surtout en tôlerie et en petite chaudronnerie.

Puissance du chalumeau : 100 litres/heure par millimètre d'épaisseur.

La soudure à gauche se subdivise en :

a) **soudure à plat,** pratiquée sur tôle de 0,5 à 3 *mm* d'épaisseur (fig. 78);

b) **soudure demi-montante,** employée pour la soudure en une seule passe (fig. 79) des tôles de 4 à 10 *mm* d'épaisseur ;

c) **soudure demi-montante en deux passes,** effectuée sur tôle de 10 à 15 *mm* d'épaisseur.

La première passe, exécutée sur la moitié de l'épaisseur, assure une pénétration continue. La deuxième passe remplit le *V* des chanfreins avec une légère surépaisseur (fig. 80).

Faire une première passe d'une longueur maximale de 80 *mm*, revenir en arrière et exécuter immédiatement la 2e passe afin d'utiliser au mieux la chaleur fournie par le chalumeau.

NOTA. — Le soudage sans métal d'apport sur bords libres ou pointés donne d'excellents résultats sur les tôles de 0,5 à 1,5 *mm* d'épaisseur.

LA SOUDURE A DROITE

Le métal d'apport suit le chalumeau au lieu de le précéder comme en soudure à gauche (fig. 81).

Elle s'exécute à plat sur tôle de 5 à 15 *mm* d'épaisseur sur bords pointés ou non ; à partir de 12 *mm* il est avantageux de souder en deux passes comme en soudure demi-montante à gauche.

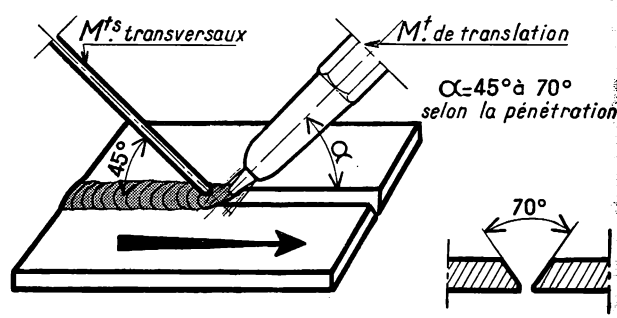


Fig. 81

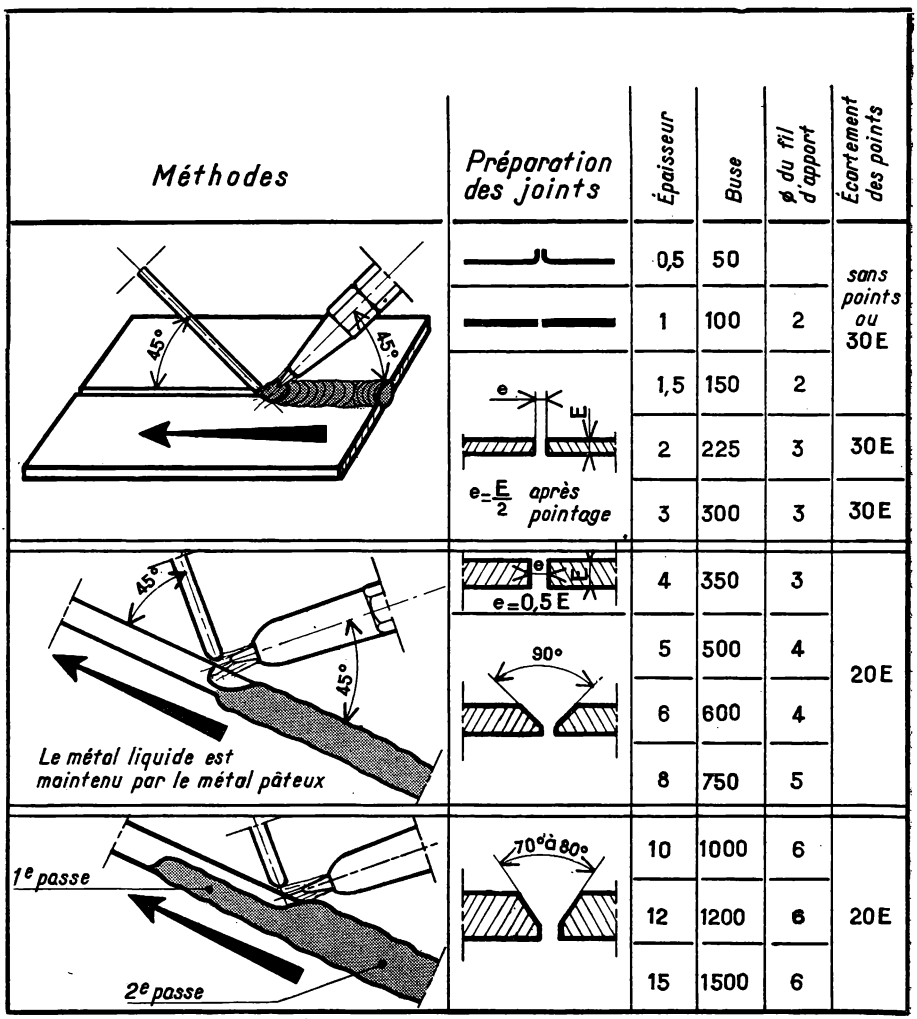


Fig. 78 - 79 - 80 — La soudure à gauche.

Débit du chalumeau : 100 litres d'acétylène à l'heure par *mm* d'épaisseur. Le diamètre du métal d'apport est égal à la moitié de l'épaisseur à souder. La soudure à droite est plus rapide que la soudure à gauche donc plus économique ; le cordon de soudure est plus étroit, les déformations sont moindres.

LA SOUDURE MONTANTE A DOUBLE CORDON

Pour qu'une soudure soit résistante il faut qu'elle présente, à l'envers comme à l'endroit, une légère surépaisseur ininterrompue et régulière.

C'est afin d'obtenir une surépaisseur *(cordon)* continue sur les deux faces, que l'on exécute la soudure à double cordon, conduite verticalement de bas en haut.

Cette soudure s'applique sur toutes les épaisseurs courantes ($e \leq 30$ *mm*) de tôles d'acier doux ou inoxydable. Elle donne dans tous les cas des résultats techniques et économiques supérieurs à toute autre méthode de soudure oxy-acétylénique, notamment pour la construction d'ouvrages soumis à de fortes pressions (réservoirs, bouteilles, chaudières, etc.).

La soudure montante à double cordon peut s'exécuter selon trois méthodes désignées par les lettres *A*, *B*, *C*.

Soudure montante à double cordon A.

Puissance maximale du chalumeau : 60 *l*/heure par *mm* d'épaisseur.

La figure 82 indique les positions du chalumeau et de la baguette.

Au début de la soudure, le chalumeau est maintenu en place jusqu'à la fusion complète des bords, il se forme alors un *trou qu'il faudra maintenir d'un bout à l'autre de la soudure.* Le bain de fusion se trouve ainsi situé à la base du trou dans un plan perpendiculaire à la surface des tôles.

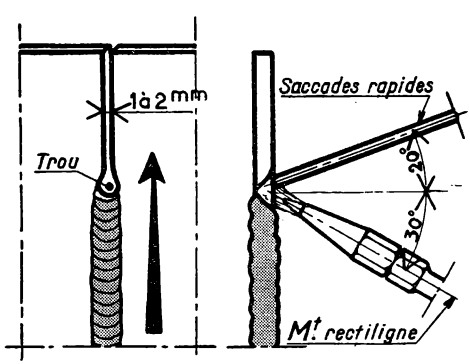


Fig. 82

Cette méthode s'applique principalement sur les tôles de 2 à 6 *mm* d'épaisseur ; elle s'emploie également sur tôles plus épaisses dont les bords sont chanfreinés : de 7 à 10 *mm* on soude en une seule passe, au-dessus de 10 *mm* la soudure

s'exécute en deux passes de 50 à 60 *mm* de longueur. La première passe se fait en maintenant un trou, la seconde termine le remplissage du chanfrein (fig. 83).

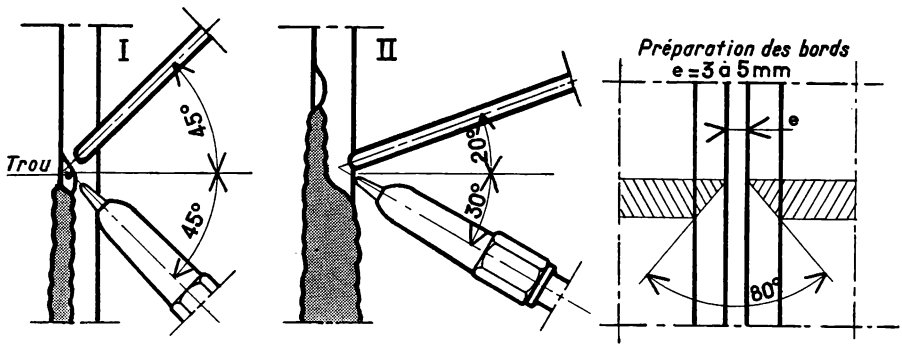


Fig. 83

Soudure montante à double cordon B.

Elle s'exécute par deux soudeurs placés respectivement devant chacune des faces de la tôle (fig. 84).

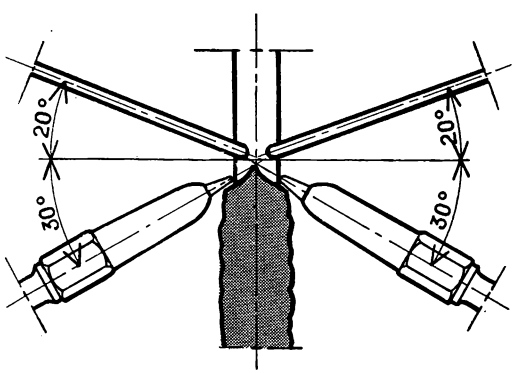


Fig. 84
Exécution des soudures à double cordon B et C.

Elle s'applique aux soudures bout à bout sur bords droits maintenus légèrement écartés de tôles de 6 à 12 *mm* d'épaisseur.

Les soudures obtenues sont excellentes et économiques ; de plus, les déformations sont réduites au minimum, c'est pour cette dernière raison qu'on emploie parfois cette méthode pour la soudure de tôles plus minces ($e \geqslant 2$ *mm*).

La puissance totale de la flamme est au maximum de 60 *l*/heure par *mm* d'épaisseur soit 30 litres par chalumeau.

La baguette de métal d'apport est animée de petits mouvements semi-circulaires transversaux.

Les deux chalumeaux, tenus à la même hauteur, assurent d'abord la fusion du métal sur toute son épaisseur (il n'y a pas formation de trou), ils se déplacent ensuite régulièrement et en synchronisme parfait.

Soudure montante à double cordon C.

Elle s'exécute simultanément par deux soudeurs comme dans la méthode précédente, sur tôles de 13 à 30 *mm* d'épaisseur préparées en double chanfrein (fig. 85).

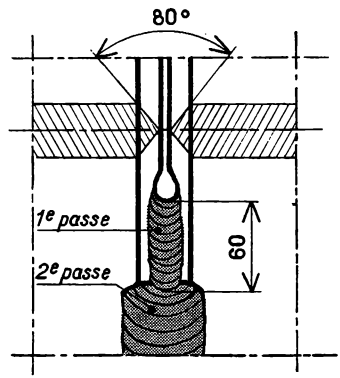


Fig. 85

Les soudures sont réalisées en une seule passe sur les tôles d'épaisseur inférieure à 25 *mm ;* en deux passes pour les épaisseurs supérieures.

CARACTÉRISTIQUES D'EXÉCUTION DES SOUDURES MONTANTES A DOUBLE CORDON

Épaisseur à souder en *mm*	Buse à employer			Diamètre du fil d'apport		
	A	B	C	A	B	C
2	100			2		
3	150	75		2	2	
4	225	100		2	2	
5	300	150		3	2	
6	350	150		3	3	
8		225			3	
10		300			3	
12		350			3	
14			350			4
16			500			4
18			500			4
20			500			4
25			750			5
30			750			5

SOUDURE SUR ANGLE EXTÉRIEUR

ou soudure suivant l'arête extérieure du dièdre formé par deux tôles. Les bords droits forment entre eux un chanfrein naturel.

On emploie les méthodes *à gauche* jusqu'à 10 *mm* d'épaisseur; *à droite* au-dessus ; parfois la soudure *montante à double cordon.*

La puissance de la flamme est de 75 litres/heure par *mm* d'épaisseur. Le diamètre du métal d'apport est le même que celui qui a été indiqué pour les méthodes à gauche. Les figures 86 et 87 montrent la préparation des tôles et la tenue du chalumeau.

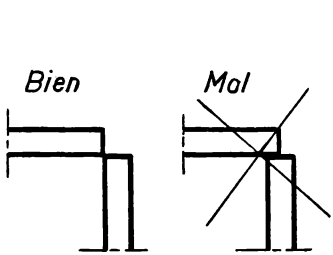


Fig. 86

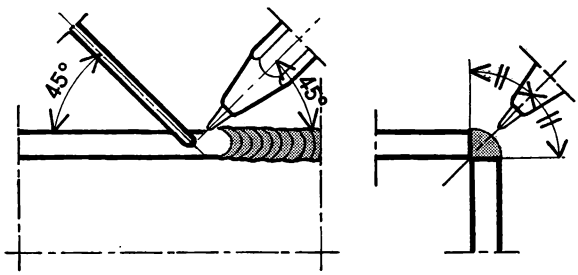


Fig. 87

La soudure en angle extérieur est économique (aucune préparation) mais, à cause de sa position, elle ne doit être employée que sur des pièces soumises à de faibles efforts.

SOUDURE EN ANGLE INTÉRIEUR OU SOUDURE EN CONGÉ

Cette soudure, suivant l'arête intérieure du dièdre, ne s'exécute plus que rarement au chalumeau. Elle est cependant encore employée dans les constructions tubulaires (collecteurs, aéronautique, bicyclettes), elle permet de simplifier les assemblages.

Il n'est pas possible d'obtenir un cordon de pénétration, et la solidité de la soudure n'est due qu'au surplus de métal d'apport.

On emploie les méthodes *à gauche.* Les figures 88, 89 et 90 indiquent les proportions du cordon de soudure, la position du chalumeau et de la baguette.

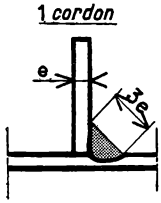


Fig. 88

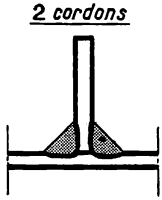


Fig. 89

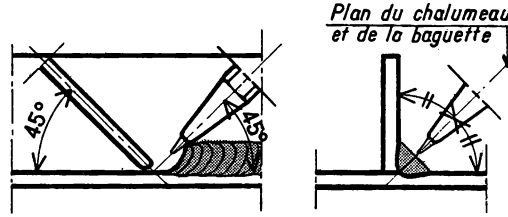


Fig. 90

Puissance du chalumeau : 125 litres/heure par *mm* d'épaisseur. La baguette est animée de mouvements semi-circulaires destinés à répartir le métal sur les deux parois.

SOUDURE AU PLAFOND

On applique la méthode *à gauche*, mais le soudeur se place dans le plan vertical de la soudure et soude en venant vers lui (fig. 91).

Les bords à assembler sont chanfreinés ; la soudure s'exécute en deux passes par portions de 60 à 80 *mm*. Cette pratique est nécessaire, d'une part, pour assurer une bonne pénétration et, d'autre part, pour avoir moins de métal à fondre à la fois.

Puissance de la flamme : 75 litres/heure par *mm* d'épaisseur.

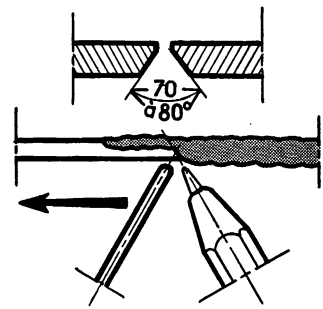


Fig. 91

REMARQUE. — Quand les deux faces sont accessibles, il y a avantage à employer la méthode à *double cordon B ou C* en prenant comme puissance de flamme : 35 litres pour le chalumeau situé au-dessus et 25 litres pour le chalumeau situé en dessous.

SOUDURE EN CORNICHE

Elle est difficile à réaliser à cause de la tendance du métal fondu à s'écouler vers le bas.

Les bords sont chanfreinés et pointés.

La puissance du chalumeau est de 75 litres/heure par mm d'épaisseur.

La soudure s'exécute suivant la méthode dite *« au bain »* en deux temps

1er *temps* (fig. 92), le chalumeau est incliné vers la gauche ;

2e *temps* (fig. 93), le chalumeau est incliné vers la droite.

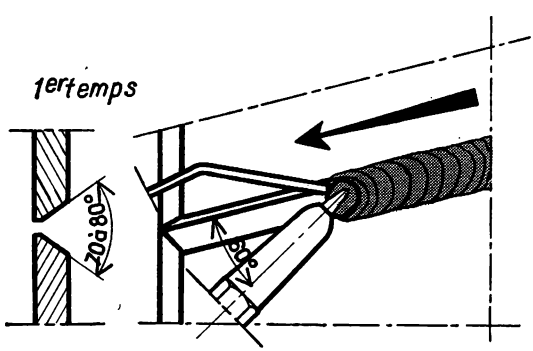


Fig. 92

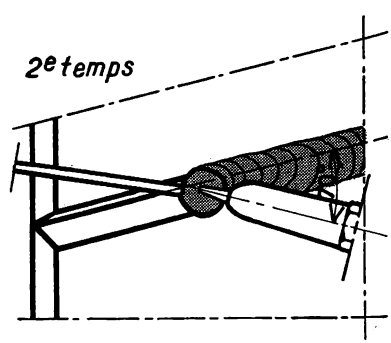


Fig. 93

REMARQUE. — Lorsque les deux faces sont accessibles, on applique les méthodes à *double cordon B ou C.* Le travail est plus facile et le résultat bien meilleur.

TABLEAU COMPARATIF DES CONSOMMATIONS ET DES VITESSES D'EXÉCUTION DES DIFFÉRENTES MÉTHODES DE SOUDAGE OXYACÉTYLÉNIQUE

	Consommation en litres par mètre de soudure						Temps d'exécution en minutes par mètre de soudure		
	Acétylène			Oxygène					
Épaisseur en *mm*	5	10	15	5	10	15	5	10	15
MÉTHODES									
A gauche	210	835	1 660	250	1 000	2 000	25	50	67
A droite	165	665	1 500	198	800	1 800	20	40	60
En angle extérieur	125	500		150	600		20	40	
En angle intérieur	250	1 000		300	1 200		25	50	
Double cordon A	150			180			30		
Double cordon B	75	248		90	288		15	24	
Double cordon C (16 *mm*)			650			780			40
En corniche	180	750		210	900		30	60	
Au plafond	235	935		290	1 120		38	75	

Ce tableau montre que les soudures les plus onéreuses sont les soudures en corniche et au plafond ; elles réclament une grande consommation de gaz et sont d'une exécution très lente.

La soudure à droite est plus rapide et consomme moins que la soudure à gauche.

La soudure en angle intérieur consomme deux fois plus de gaz que la soudure en angle extérieur qui est économique.

Les soudures à double cordon, surtout la méthode *B*, sont nettement les plus économiques et les plus rapides.

CONCLUSION. — Les soudures montantes à double cordon doivent être préférées à toute autre méthode à partir d'une épaisseur de 2 *mm* lorsque l'on exige de la soudure de bonnes qualités technologiques.

Les défauts des soudures

Les figures 94 et 95 montrent l'aspect d'une soudure correctement exécutée.

Les défauts des soudures ont pour causes: soit une mauvaise préparation des joints à souder, soit une mauvaise exécution.

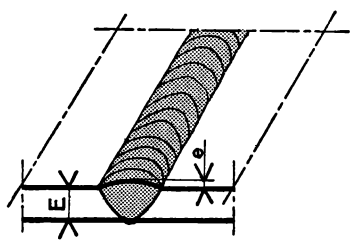


Fig. 94
Légère surépaisseur e maximale: 0,15 E

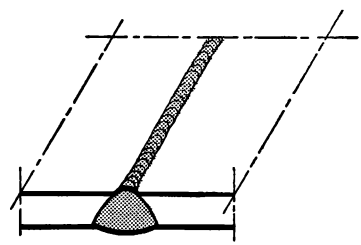


Fig. 95
Cordon de pénétration continu

DÉFAUTS DE PRÉPARATION

Absence de chanfrein ou chanfrein mal fait.

Dénivellation des bords (fig. 96), défaut qui fait travailler la soudure au cisaillement lors du dressage de celle-ci ou à l'usage ; il s'évite facilement sur pièce pointée par un martelage des points avant soudage.

Chevauchement (fig. 97), défaut semblable au précédent, mais plus accentué.

Écartement excessif (fig. 98), il oblige à déposer beaucoup de métal d'apport qu'il est difficile de bien lier avec les bords ; soudure plus lente, plus onéreuse, de faible résistance.

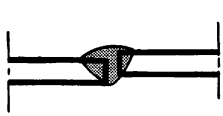


Fig. 96

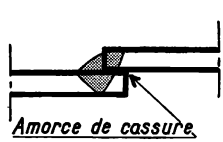


Fig. 97

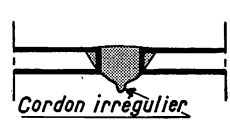


Fig. 98

DÉFAUTS D'EXÉCUTION

Le manque de pénétration (fig. 99) est un grave défaut qui diminue la résistance de la soudure, non seulement en raison de la portion non soudée, mais aussi par la constitution d'une amorce de cassure à l'envers de la soudure.

Le collage se produit lorsque le métal de base n'est pas en fusion au moment où le métal d'apport est déposé (fig. 100). Ce défaut, aussi grave que le précédent, a les mêmes conséquences.

Les caniveaux sont des dépressions longitudinales produites soit d'un seul côté de la soudure (mauvaise tenue du chalumeau) soit des deux côtés (flamme trop puissante) (fig. 101).

Ce défaut, moins grave que les précédents, diminue cependant la résistance de l'assemblage.

L'insuffisance d'apport de métal produit une soudure creusée qui manque de résistance (fig. 102).

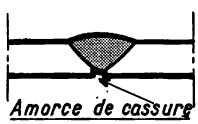


Fig. 99

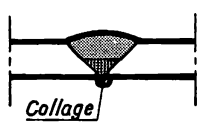


Fig. 100

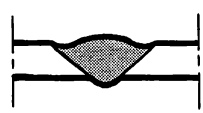


Fig. 101

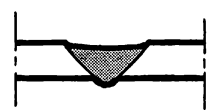


Fig. 102

Les interpositions d'oxyde empêchent la liaison intime des parties de la soudure, elles se produisent notamment lorsque, pendant la reprise d'une soudure, le métal n'est pas suffisamment fondu.

Les soufflures sont provoquées par des inclusions de gaz dégagés pendant la fusion, elles proviennent soit de la nature du métal ou de l'alliage, soit d'un retrait brusque du chalumeau, ce qui accélère la solidification du métal et empêche les gaz de s'échapper.

La dénaturation du métal abaisse ses caractéristiques mécaniques ; elle peut avoir pour causes: la mauvaise soudabilité du matériau de base, l'emploi d'un métal d'apport non approprié ou l'emploi d'une flamme mal réglée (oxydante ou carburante).

CHAPITRE VIII

LE SOUDAGE A L'ARC ÉLECTRIQUE

ÉTUDE SOMMAIRE DE L'ARC ÉLECTRIQUE

Principe.

La rupture brusque d'un fil conducteur traversé par un courant électrique produit un arc qui tend à maintenir le passage du courant. Pour réaliser une soudure, on fait jaillir un arc entre la pièce à souder, reliée à l'une des bornes d'un générateur et une électrode reliée à l'autre borne. La température de l'arc atteint environ 3 000° C.

L'**électrode** est constituée soit par un *charbon* (graphite), soit par une *baguette de métal.* On emploie presque exclusivement l'électrode métallique dont la fusion constitue le métal d'apport, tandis que l'électrode en charbon nécessite l'emploi d'une baguette de métal destiné à fournir la soudure.

L'arc est un fuseau très lumineux qui jaillit entre l'extrémité de l'électrode et une zone fondue de la pièce, en forme de cuvette, nommée *cratère.* Les gouttes de métal en fusion provenant de l'électrode sont projetées sur le métal également en fusion du cratère auquel elles se lient intimement (fig. 1 et 2).

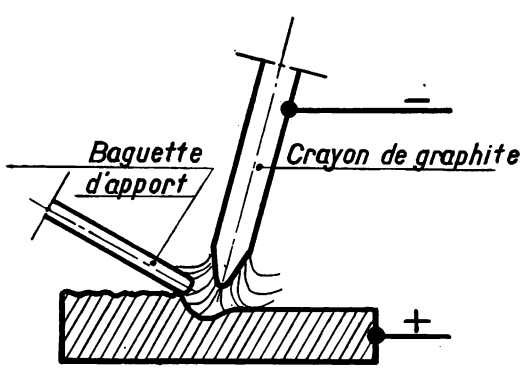


Fig. 1
Électrode charbon.

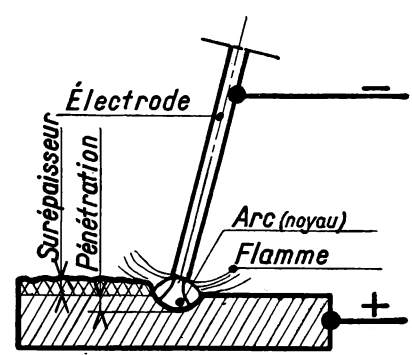


Fig. 2
Électrode métallique.

Pour amorcer un arc électrique il faut:

a) disposer d'un courant d'une intensité minimale pour porter à l'incandescence l'extrémité de l'électrode (cathode ou pôle —), il suffit alors de mettre en contact la pièce et l'électrode pour obtenir l'échauffement nécessaire par *effet Joule:*

b) disposer d'une tension suffisante pour provoquer *l'ionisation* du milieu, c'est-à-dire diminuer la résistance électrique de la colonne d'air séparant l'électrode de la pièce à souder.

Dans la pratique, le soudeur frotte l'électrode sur la pièce à souder (il réalise ainsi un contact tout en évitant le collage de l'électrode sur le métal) puis l'écarte légèrement. Au moment du contact le courant passe dans le circuit, il continue à y circuler *en formant un arc* lorsque l'électrode est écartée parce que l'air est devenu conducteur et facilite ainsi le déplacement des *électrons* entre la pièce et l'électrode.

Le passage de chaque goutte d'électrode (10 à 20 par seconde) à la pièce crée un *court-circuit:* il en est de même lorsque, pour amorcer l'arc, l'électrode est amenée en contact avec la pièce.

Afin d'empêcher que les accroissements importants et subits d'intensité provoqués par ces courts-circuits répétés apportent des perturbations dans l'installation, il faut intercaler entre la source d'énergie électrique (ligne d'alimentation à tension normale ou dynamo) et la pièce à souder, des appareils conçus à cet effet, et dont l'ensemble constitue le poste de soudage.

Les postes de soudage à l'arc électrique

Un poste de soudage à l'arc est caractérisé par:

— la *nature* du courant, continu, alternatif ou redressé, qu'il fournit pour donner naissance à l'arc.

Les postes à *courant continu* donnent un arc stable et qui s'amorce facilement avec n'importe quelles électrodes, tandis que les postes à courant alternatif ne fonctionnent bien qu'avec des électrodes spécialement préparées.

Toutefois les postes à *courant alternatif* sont moins coûteux que les postes à courant continu.

— la *tension à vide* ou *tension d'amorçage* de l'arc: 70 à 80 volts, suivant les électrodes employées ;

— l'*intensité* qu'il peut supporter, et qui doit être suffisante pour produire un arc capable de fondre l'électrode et la partie de la pièce intéressée par la soudure.

La valeur de l'intensité dépend de la composition de l'électrode et de son diamètre, exemple: *électrode fusarc Marine spéciale* 45.

Diamètre des électrodes, *mm*	1,25	1,6	2	2,5	3,15	4	5	6,3	8
Intensité du courant, ampères	15 à 20	25 à 30	40 à 50	60 à 80	100 à 150	140 à 180	180 à 300	275 à 440	300 à 500

— ***sa propriété auto-régulatrice*** c'est-à-dire son aptitude à abaisser automatiquement sa tension à vide jusqu'à la tension en charge ou tension d'arc (20 à 30 V).

LES POSTES DE SOUDAGE SONT CLASSÉS EN DEUX GRANDS GROUPES

1° **Les postes statiques** qui ne renferment aucun organe important en mouvement. Ce sont les plus simples; alimentés en courant alternatif par le secteur, ils fournissent un courant alternatif à la tension à vide convenable. Certains, ***dits redresseurs de soudure,*** donnent un courant « redressé », assez semblable au courant continu, obtenu au moyen de tubes à cathode de mercure.

2° **Les postes rotatifs** qui sont des machines tournantes composées essentiellement d'un *générateur de courant,* généralement une *dynamo* qui produit du courant continu, et de son moteur d'entraînement (électrique ou thermique). Les postes les plus répandus sont les *postes statiques auto-régulateurs* montés sur chariot à roues et les *groupes rotatifs à génératrice auto-régulatrice* (à moteur et génératrice séparés ou monobloc). Les figures 3 et 4 en schématisent l'installation.

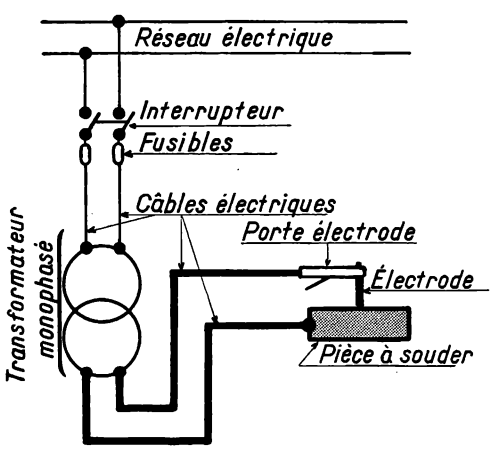


Fig. 3
Schéma d'installation d'un poste statique.

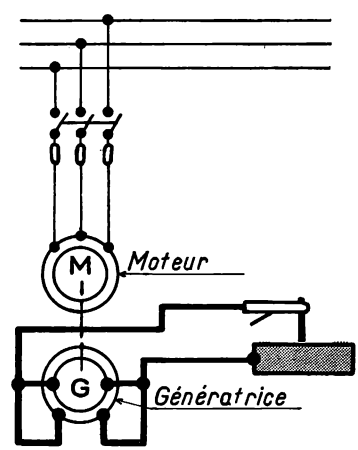


Fig. 4
Schéma d'installation d'un poste rotatif.

RÉGLAGE DES INTENSITÉS DE SOUDAGE

Le réglage des intensités des postes statiques se fait au moyen d'appareils tels que **rhéostats,** manœuvrés par leviers (fig. 5), **auto-transformateurs à prises** par fiches, **inductances variables** (shunts magnétiques rotatifs ou se déplaçant par translation, manœuvrés à l'aide de volants, fig. 6 et 7).

Sur les postes rotatifs, le réglage du courant de soudage se fait soit par rhéostat d'excitation, soit par décalage des balais. Les cadrans de réglage indiquent souvent simultanément l'intensité du courant et le diamètre de l'électrode correspondant.

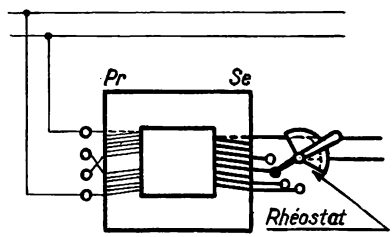


Fig. 5

Choix d'un poste de soudage à l'arc. Ce choix sera dicté par: la nature et l'importance des travaux à exécuter (temps d'utilisation, composition et diamètre des électrodes), la nature du courant fourni par la source (continu ou alternatif), la puissance exigée et les conditions d'équilibre du réseau.

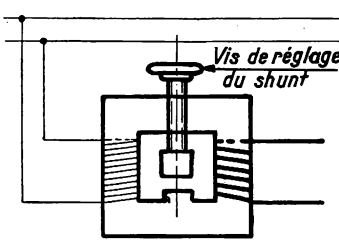


Fig. 6

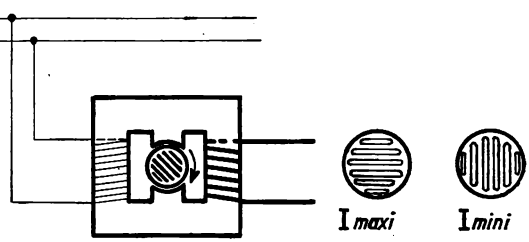


Fig. 7

CENTRALE DE SOUDAGE A L'ARC ÉLECTRIQUE

Lorsque plusieurs soudeurs travaillent à proximité les uns des autres, il peut être avantageux d'installer une centrale de soudage produisant un *courant de soudage à tension constante.*

La centrale est constituée soit par des génératrices (courant continu), soit par des transformateurs monophasés ou triphasés (courant alternatif).

Les postes individuels sont alors réduits aux organes réalisant l'auto-régulation: une *résistance réglable*, pour le courant continu, une *bobine de self*, pour le courant alternatif.

MACHINES DE SOUDAGE AUTOMATIQUE A L'ARC ÉLECTRIQUE

Elles sont employées pour les fabrications en série.

Elles se composent essentiellement d'un dispositif d'entraînement du fil électrode, appelé *« tête automatique »*, et d'un *appareillage électrique qui contrôle les mouvements du moteur de la tête* et les associe aux mouvements de déplacement par rapport à la pièce à souder, il maintient une longueur d'arc constante et assure une vitesse constante d'avancement de l'électrode.

Grâce à la continuité du travail et à la possibilité d'utiliser de fortes intensités de courant, ces machines réalisent des soudures à grandes vitesses.

Les électrodes métalliques

Elles assurent un double rôle: celui de conducteur de courant électrique et celui de métal d'apport.

Si l'électrode est simplement constituée par un fil de métal de section circulaire, elle est dite *nue;* si le fil métallique est entouré d'une gaine fusible de produits appropriés, l'électrode est dite *enrobée* (fig. 8).

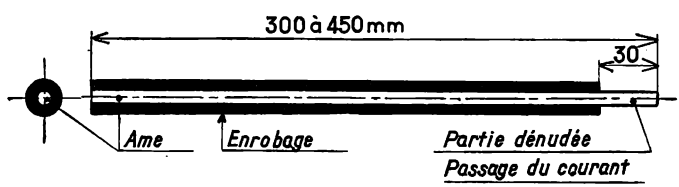


Fig. 8

Les électrodes nues ont de nombreux inconvénients dont le principal est la *dénaturation du métal fondu* par l'action de l'oxygène et de l'azote de l'air. Elles produisent un arc instable dont l'amorçage est difficile. On ne les utilise qu'en courant continu et de plus en plus rarement.

LES ÉLECTRODES ENROBÉES

Le prodigieux développement de la soudure à l'arc électrique est dû en grande partie aux améliorations apportées à l'enrobage des électrodes.

L'enrobage est un mélange très complexe de *matières organiques et minérales*, qui varie suivant les résultats recherchés. Il peut être acide, basique, rutile, oxydant ou cellulosique.

Tous les enrobages contiennent des produits qui facilitent la désoxydation et la dénitruration du métal fondu, ainsi que des produits volatils qui dégagent des gaz réducteurs.

Rôles de l'enrobage. — L'enrobage agit sur les caractéristiques électriques de l'arc et sur les caractéristiques métallurgiques de la soudure ; il influe également, dans une large mesure, sur l'aspect du cordon de soudure, la vitesse de fusion, le degré de pénétration et la facilité du soudage.

Rôle électrique. — L'arc électrique ne peut subsister que si les gaz situés entre la pièce et l'électrode sont *ionisés*. En courant continu, la température élevée de l'électrode (cathode) entretient l'ionisation des gaz dans lesquels jaillit l'arc et celui-ci reste stable ; par contre, en courant alternatif l'arc s'éteint à chaque demi-période, le réallumage de l'arc et sa stabilité sont obtenus par le dégagement de *vapeurs ionisantes* produites par les sels, principalement de sodium et de potassium, contenus dans l'enrobage.

Rôle métallurgique. — Il se manifeste de plusieurs façons :

a) *en protégeant le métal en fusion contre l'action de l'air ambiant* par émission d'une atmosphère gazeuse qui favorise la désoxydation et la dénitruration du métal en fusion ;

b) *en introduisant dans le bain de fusion des oxydes métalliques* qui ont pour but de remplacer certains éléments du métal de base qui partent par volatilisation. Ces produits permettent d'obtenir la composition chimique et les caractéristiques mécaniques désirées du métal déposé.

Il est même possible, en incorporant dans l'enrobage des *ferro-alliages*, d'obtenir de la fonte ou des aciers spéciaux en partant d'une électrode à âme en acier doux ;

c) *en protégeant le métal déposé, par formation d'un laitier* qui agit comme fondant et comme épurateur. En outre, il protège le métal solidifié, mais encore à haute température, contre l'action de l'air ; il assure la régulation de sa vitesse de refroidissement ;

Rôle mécanique.

a) L'enrobage contient des constituants qui retardent légèrement sa fusion par rapport à celle du métal de l'âme, ce qui produit un effet directionnel de l'arc, il lui sert de guide et améliore la protection contre l'air ambiant.

b) *Suivant l'épaisseur de l'enrobage, on obtient des cordons de soudure de différents aspects ;* les figures 9 et 10 donnent des exemples de cordons obtenus avec des enrobages *minces* (I), *semi-épais* (II) et *épais* (III).

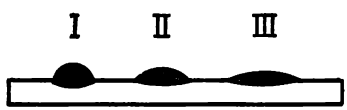


Fig. 9

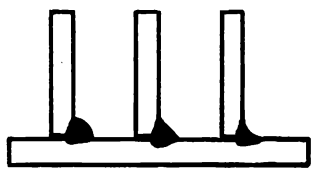


Fig. 10

L'enrobage peut aussi disparaître en partie pendant la soudure ; selon cette plus ou moins grande aptitude il est dit *volatil* ou *semi-volatil.*

C'est aussi la nature de l'enrobage qui permet et facilite l'exécution de soudures en position (notamment descendante).

L'enrobage oxydant permet ce qu'il est convenu d'appeler le *soudage automatique manuel,* c'est-à-dire que le soudeur ne fait que déplacer l'électrode en la laissant en contact avec la pièce alors qu'ordinairement l'électrode doit être maintenue à une distance constante de la pièce.

Choix des électrodes. — Il existe une très grande variété d'électrodes pour le soudage des aciers ordinaires au carbone, des aciers spéciaux et inoxydables, pour les travaux de rechargement, pour le soudage de la fonte, des métaux et alliages non ferreux.

Pour choisir une électrode, il faut tenir compte:

a) de la nature du métal à souder et des caractéristiques mécaniques recherchées,

b) des facilités d'exécution de la soudure,

c) du prix de revient de la soudure.

CLASSIFICATION DES ÉLECTRODES SUIVANT LA NATURE DE LEUR ENROBAGE

— **Électrodes à enrobage acide.** — L'enrobage est un mélange d'oxydes de fer, de silice, de silicates naturels et des produits désoxydants et dénitrurants sous forme de ferro-alliages ; il dégage de la chaleur en fondant ; cet apport de chaleur accroît la vitesse de fusion.

L'enrobage étant très *ionisant* l'amorçage est très facile. Ce type d'électrode peut être utilisé aussi bien en *courant alternatif* qu'en *courant continu* à une tension d'amorçage relativement faible (40 *V* environ). L'arc est très stable.

Le laitier est très abondant et se détache facilement. Cette abondance de laitier tend à le faire effondrer ce qui gêne lorsqu'on soude en position. Les électrodes à enrobage acide sont généralement *réservées au soudage à plat. Les caractéristiques du métal déposé sont moyennes.*

— **Électrodes à enrobage basique.** — L'enrobage est un mélange de carbonates à chaleur de formation élevée avec un fondant et addition de produits désoxydants et dénitrurants sous forme de ferro-alliages ; il absorbe de la chaleur en fondant, la vitesse de fusion est donc assez faible.

L'enrobage de ces électrodes est très *peu ionisant*, leur utilisation en courant alternatif ne peut se faire que sous une tension d'amorçage élevée (75 *V* environ) ; elles sont surtout utilisées en *courant continu.*

Les électrodes à enrobage basique sont celles qui déposent un métal ayant *les meilleures caractéristiques mécaniques*, notamment au point de vue résilience et allongement.

— **Électrodes à enrobage rutile.** — Leur enrobage contient une forte proportion d'oxyde de titane (*rutile*) ainsi que des silicates naturels et des ferro-alliages comme éléments affinants. Les qualités de ces électrodes se situant entre celles des électrodes acides et celles des électrodes basiques réunissent toutes les qualités, mais atténuées, des unes et des autres ; elles permettent :

— le passage sur tous courants,
— le soudage en position,
— un soudage facile,
— l'obtention d'une vitesse de fusion satisfaisante,
— l'obtention d'une soudure de bel aspect.

Les caractéristiques mécaniques du métal déposé sont semblables à celles obtenues avec un enrobage acide. Ces électrodes sont les plus employées parmi les électrodes courantes.

— **Électrodes à enrobage oxydant.** — L'enrobage est un mélange d'oxydes de fer et de manganèse, de silice, de silicates naturels avec peu ou pas d'éléments désoxydants ; il est très fusible mais le laitier s'effondre ce qui interdit l'utilisation de ces électrodes en toutes positions.

Les électrodes à enrobage oxydant sont faciles d'emploi, elles peuvent passer sur tous les courants. Elles ne sont utilisées que dans des cas particuliers :

— soudage des tôles minces, pointage, *soudage en automatique manuelle.*

— **Les électrodes à enrobage cellulosique.** — L'enrobage est à base de produits volatils (cellulose de bois ou de coton) contenant aussi des silicates naturels et des ferro-alliages réducteurs. On emploie surtout des enrobages *faiblement*

cellulosiques car la matière organique, contenue dans l'enrobage, dégage en brûlant une grande quantité de fumées qui incommodent le soudeur.

Il est possible de les utiliser sur tous les courants. Le laitier est peu abondant. Ces électrodes sont intéressantes pour *l'exécution des soudures en position descendante.* Les caractéristiques mécaniques du métal déposé sont équivalentes à celles obtenues par les électrodes acides.

CODE DE SYMBOLISATION DES ÉLECTRODES ENROBÉES POUR SOUDAGE MANUEL A L'ARC ÉLECTRIQUE DES ACIERS NON ALLIÉS OU FAIBLEMENT ALLIÉS

Le mode de codification se fait au moyen de symboles: symbole général **E** (électrode enrobée) suivi des symboles relatifs aux caractéristiques mécaniques (3 chiffres) du symbole indiquant le type d'enrobage (1 lettre) et des symboles relatifs aux conditions d'emploi (2 chiffres).

EXEMPLE: **E 254 B 10.**

Les tableaux suivants donnent les valeurs de ces symboles:

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DU MÉTAL DÉPOSÉ

Symbole	Résistance à la traction minimale	Allongement minimal	Résilience minimale
	hbar	%	daJ/cm²
0	—	—	—
1	40,20	14	4,90
2	43,15	18	6,86
3	47,07	22	8,82
4	50,99	26	10,78
5	54,92	30	12,74
6	58,84		

TYPE D'ENROBAGE

Symbole	Enrobage
O	Oxydant
B	Basique
R	Rutile
A	Acide
C	Cellulosique
V	Autres types

Symbole général **E 2 5 4 B 1 0**

POSITION DE SOUDAGE

Symbole	Position
1	Toutes positions.
2	Toutes positions, excepté la position verticale pour la méthode descendante.
3	A plat, en gouttière, en angle à plat.
4	A plat, en gouttière.

COURANT DE SOUDAGE

Symbole	Courant continu Polarité recommandée (2)	Courant alternatif Tension à vide nominale (V)
0 (1)	+	
1	non spécifiée	50
2	—	50
3	+	50
4	non spécifiée	70
5	—	70
6	+	70
7	non spécifiée	90
8	—	90
9	+	90

Le symbole **0** est réservé aux électrodes utilisées uniquement en courant continu.

L'électrode E 254 B 10 dépose du métal dont les caractéristiques mécaniques sont:

$$\mathbf{R}^{2} = 43{,}15 \text{ hbar} \qquad \mathbf{A}^{5} = 30\% \qquad \mathbf{KCU}^{4} = 10{,}78 \text{ daJ/cm}^2$$

Son enrobage est du type basique (B) ; elle peut s'employer en toutes positions (1) mais exclusivement en courant continu (0) ; elle doit être reliée au pôle positif.

DÉFAUTS DES ÉLECTRODES

Le métal constituant l'âme offre généralement toute garantie. Les principaux défauts proviennent de l'enrobage ; ce sont:

— ***une grande fragilité,*** cause de fissures ou de décollements ;

— ***une hétérogénéité chimique*** qui provoque des inégalités de propriétés mécaniques ;

— ***un mauvais centrage*** (fig. 11), l'enrobage fond inégalement, ce qui gêne le soudeur et favorise les inclusions de laitier dans le métal fondu ;

— ***une épaisseur irrégulière*** qui occasionne des difficultés de travail et donne un métal fondu hétérogène ;

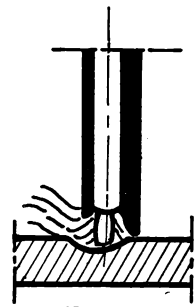


Fig. 11

— ***une faible résistance à l'humidité*** qui rend les électrodes rapidement inutilisables.

REMARQUE. — On protège les électrodes de l'humidité (surtout celles du type basique) en les conservant dans des étuves. Des étuis étanches, d'une contenance d'un paquet, maintiennent les électrodes au sec en cours d'utilisation.

La pratique du soudage à l'arc électrique

UNE INSTALLATION DE SOUDAGE COMPREND ESSENTIELLEMENT UN POSTE DE SOUDAGE

relié à un réseau de distribution électrique par *un câble d'alimentation* (câble primaire) en passant par des appareils de commande et de protection contre les surintensités et le manque de tension (interrupteur, fusibles, disjoncteurs, contacteurs-disjoncteurs).

Du poste partent *deux câbles secondaires* terminés l'un par la *pince porte-électrode*, c'est le câble soudage ; l'autre par une *prise de masse* (serre-joint, pince ou à adhérence magnétique) amenant le courant à la pièce à souder, c'est le câble masse.

Les pinces porte-électrodes doivent permettre de maintenir l'électrode sans grand effort de la main, être légères et bonnes conductrices de l'électricité (fig. 12), mais bien isolées électriquement et calorifiquement.

Les câbles conducteurs d'un diamètre convenable, doivent être parfaitement isolés et être souples, particulièrement le câble de pince.

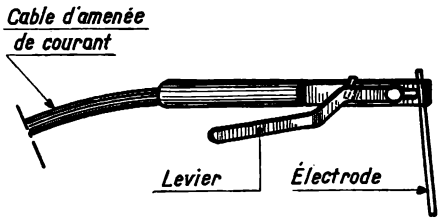


Fig. 12

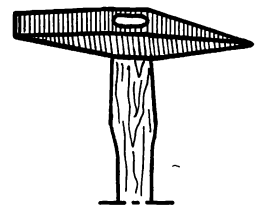


Fig. 13

La prise de masse doit être robuste et assurer un contact électrique constant avec la pièce à souder.

Le laitier est éliminé avec un *marteau à piquer* (fig. 13) et une *brosse métallique*.

DIVERS ACCESSOIRES PROTECTEURS SONT NÉCESSAIRES POUR ASSURER L'HYGIÈNE ET LA SÉCURITÉ DES SOUDEURS :

contre les dangers du courant électrique, contre les projections de gouttelettes de métal en fusion et parfois contre les fumées nocives dues à la combustion de l'enrobage de certaines électrodes.

Les yeux sont préservés des rayons lumineux à grand éclat, et surtout contre les rayons ultra-violets et infra-rouges, par des *verres filtrants* montés sur un ***masque*** (fig. 14) tenu à la main ou sur un ***casque*** (celui-ci offre l'avantage de laisser les deux mains libres).

Masques et casques se font en matériaux légers et non conducteurs de l'électricité: contreplaqué ou fibre.

Des gants en amiante, cuir ou basane, protègent les mains contre le contact des pièces métalliques sous tension, contre les rayons et contre les gouttelettes de métal en fusion.

Un tablier de cuir ou d'amiante met les vêtements à l'abri des brûlures.

Les locaux de soudage doivent être spacieux et largement aérés. Le cas échéant, des appareils de ventilation sont prévus pour évacuer rapidement les fumées.

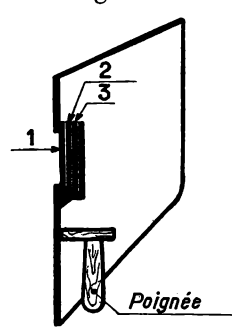


Fig. 14

Coupe d'un masque. Le verre teinté 2 est protégé des poussières par le verre transparent 3 et des projections de métal en fusion par le verre transparent 1.

LES MÉTHODES DE SOUDAGE

La soudure électrique s'exécute sur joints bord à bord, en angle extérieur en angle intérieur, à clin et aussi en *bouchon*, c'est-à-dire par remplissage de trous.

Les joints bord à bord et en angle extérieur peuvent être soutenus à l'envers par une plaque de *cuivre* ou de *graphite* qui évite les effondrements de métal fondu. Pour éviter la formation de soufflures, fréquentes par ce procédé, on emploie de préférence des *plaques supports rainurées* qui permettent d'obtenir un bon cordon de pénétration (fig. 15).

Fig. 15
Emploi d'un support rainuré.

Fig. 16
Sans reprise à l'envers.

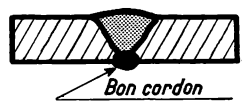


Fig. 17
Soudure avec reprise à l'envers.

Les joints non soutenus sont exécutés avec ou sans ***reprise à l'envers*** (fig. 16 et 17).

A chaque fois que l'envers est accessible, il faut adopter le joint avec reprise à l'envers qui offre plus de garanties de sécurité que le joint sans reprise.

La soudure à l'arc électrique peut se pratiquer dans toutes les positions: horizontale, verticale (ascendante ou descendante), en corniche, au plafond.

La soudure horizontale est la plus facile à réaliser, c'est pour cette raison qu'on emploie de plus en plus des appareils dits « *positionneurs* ».

Les positionneurs à plateau (fig. 18) ou à galets sont des machines mécaniques destinées:

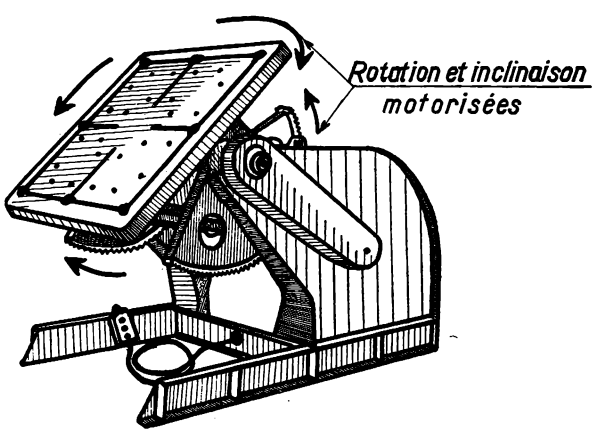


Fig. 18

a) à incliner les pièces à volonté pour présenter le joint dans la position la plus favorable à l'exécution de la soudure.

b) à animer la pièce d'un mouvement de rotation uniforme à la vitesse désirée.

Ils permettent également l'utilisation des procédés de soudage automatique ou semi-automatique.

REMARQUE. — La position de soudage est d'une importance déterminante pour la quantité de métal qui peut être déposée dans l'unité de temps. Ainsi, une soudure d'angle intérieur exécutée dans la position I (fig. 18 bis) est obtenue en trois passes déposées avec une électrode de diamètre normal.

Pour augmenter a productivité, cette soudure peut être exécutée dans la même position (II) en une seule passe avec une grosse électrode et un courant de grande intensité, mais il y a formation d'un *caniveau* important sur la tôle verticale.

Cette même soudure, exécutée suivant la position III, obtenue facilement par un positionneur, peut être réalisée *correctement* en une seule passe avec une électrode de gros diamètre.

Le positionnement augmente la productivité tout en rendant plus facile le travail du soudeur.

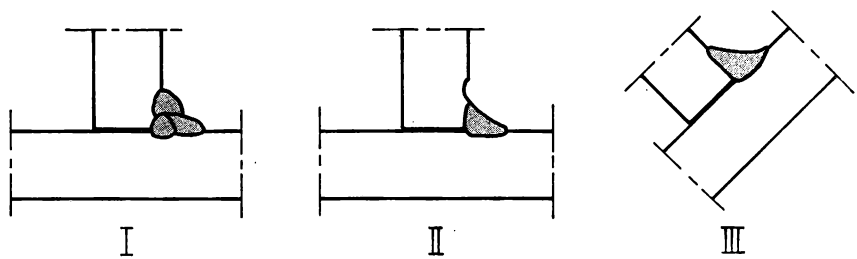


Fig. 18 bis

L'apport de métal s'effectue généralement en de nombreuses passes, selon trois types principaux : *passe étroite, passe large, passe triangulaire.*

La passe étroite, ou longitudinale, est un dépôt de métal réalisé par un simple mouvement de translation de l'électrode (fig. 19).

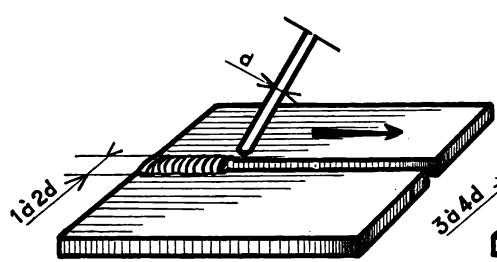


Fig. 19
Passe étroite.

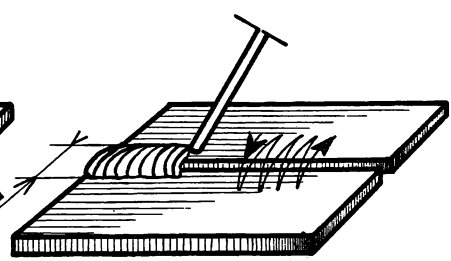


Fig. 20
Passe large.

La passe large est obtenue par une électrode animée de mouvements transversaux (fig. 20).

La passe triangulaire s'emploie en soudure montante ou demi-montante sur joints bord à bord chanfreinés, à clin ou en angle. Elle est constituée par superposition de dépôts triangulaires obtenus par déplacements de l'électrode suivant un triangle *abc* (fig. 21) dont le sommet *a* est maintenu plus haut que les deux autres afin que le laitier s'écoule à l'extérieur.

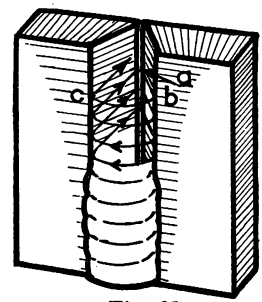


Fig. 21
Passe triangulaire.

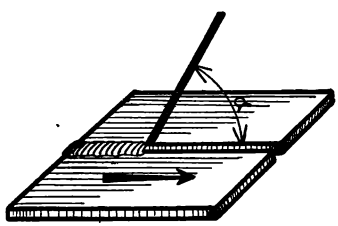
REMARQUE. — D'une manière générale, les déformations sont moindres :

a) par la méthode des passes larges, lorsqu'il n'y a pas bridage des pièces à souder;

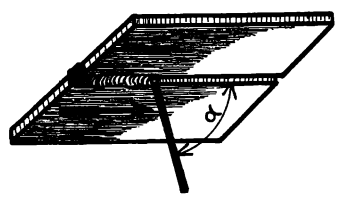
b) par la méthode des passes étroites lorsque la soudure est bridée.

Inclinaison de l'électrode : elle varie avec la position de la soudure et l'électrode employée. Les figures 22 à 27 donnent les inclinaisons courantes.

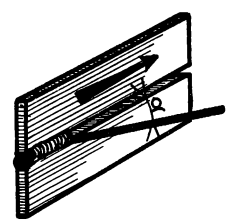
En soudure à plat, si l'électrode est très inclinée, l'effet dynamique de l'arc chasse le métal fondu hors du bain de fusion. Si l'électrode est trop verticale, le bain de fusion devient très important et l'extrémité de l'électrode se trouve plongée dans le métal liquide ce qui provoque: soit le perçage des tôles à souder, soit un court-circuit figeant l'électrode dans le métal.



α 50 à 70°
Fig. 22
Soudage à plat.



α 70 à 90°
Fig. 23
Soudage au plafond.



α 50 à 70°
Fig. 24
Soudage en corniche.

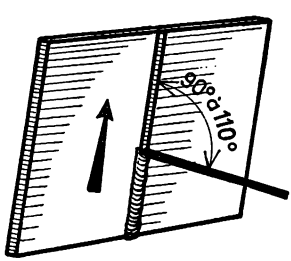


Fig. 25
Soudage montant.

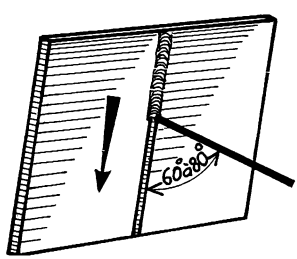
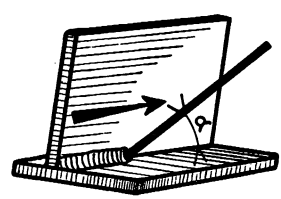


Fig. 26
Soudage descendant.



α = 30 à 45°
Fig. 27
Soudage en angle à plat.

Nombre et ordre d'exécution de chaque passe. Le nombre de passes d'une soudure varie selon le type d'électrodes employées, leur diamètre, l'intensité du courant, l'habileté du soudeur et aussi selon les déformations dues au retrait qui pourront être prévues.

Exemples de soudage d'une tôle de 10 mm d'épaisseur avec reprise à l'envers :

1° deux passes larges avec électrodes à enrobage mince, ∅ 4 *mm* pour la première passe et la reprise, ∅ 5 *mm* pour la deuxième passe (fig. 28).

2° trois passes larges avec électrodes à enrobage mince, ∅ 3,25 *mm* pour la première passe et la reprise, ∅ 4 *mm* pour les autres passes (fig. 29);

3° quatre passes larges avec électrodes à enrobage épais, ∅ 3,25 *mm* pour la première passe et la reprise, ∅ 4 *mm* pour les autres passes (fig. 30);

4° dix passes étroites avec électrodes à enrobage épais, ∅ 3,25 *mm* pour la première passe et la reprise, ∅ 4 *mm* pour les autres passes (fig. 31).

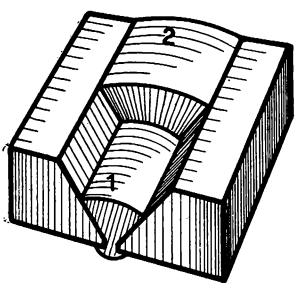


Fig. 28
2 passes larges.

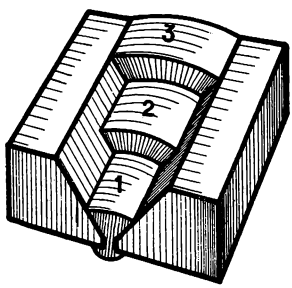


Fig. 29
3 passes larges.

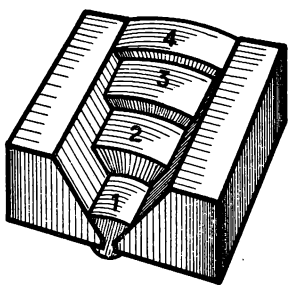


Fig. 30
4 passes larges.

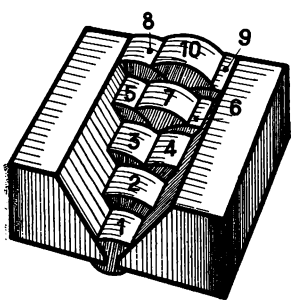


Fig. 31
10 passes étroites.

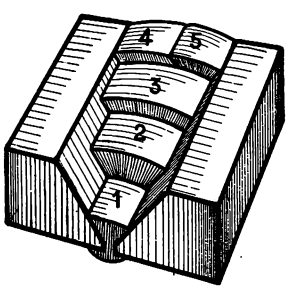


Fig. 32
3 passes étroites, 2 passes larges.

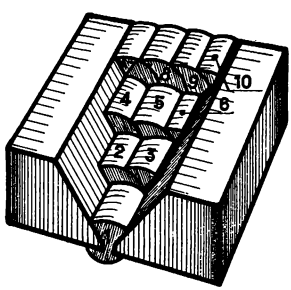


Fig. 33
Mauvaise répartition des passes. Collage en 3, 6, 10.

Dans certains cas, on combine les passes étroites et les passes larges ; *exemple :* trois passes étroites, 1, 2, 3, et deux passes larges, 4 et 5 (fig. 32).

Les passes sont exécutées dans un ordre tel qu'il facilite l'élimination du laitier par piquage et brossage. Si les passes sont exécutées dans un ordre quelconque (fig. 33), les inclusions de laitier non éliminé provoquent le collage sur les bords du chanfrein.

PRÉPARATION DES BORDS A SOUDER

Elle dépend, pour un même métal, de son épaisseur, du type de joint à réaliser et, parfois, de la position dans laquelle doit être exécutée la soudure.

1° **Soudure bord à bord.** — Généralement, les tôles ne sont chanfreinées qu'à partir d'une épaisseur de 4 ou 5 *mm* ; au-dessous, elles sont écartées l'une de l'autre d'environ une demi-épaisseur.

Lorsque la soudure est accessible sur les deux faces, on adopte le chanfrein en X qui demande deux fois moins de métal que le chanfrein en *V*.

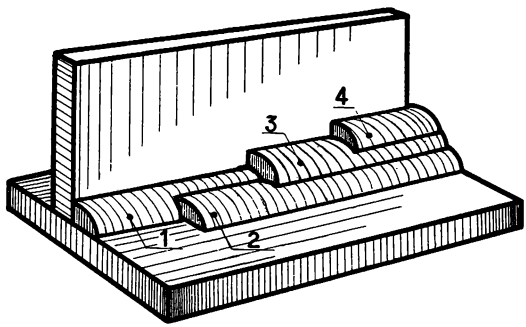


Fig. 34

Disposition des cordons dans le soudage d'angle à plat.

Tous les chanfreins, à de rares exceptions près, se terminent par un *méplat* ou *talon* à la base (fig. 35 à 40).

A partir d'une épaisseur de 25 *mm*, on peut adopter les chanfreins dits *cylindro-coniques* (fig. 36-39) ou en *tulipe* (fig. 37-40). Ils réduisent l'apport de métal, mais sont d'une exécution coûteuse.

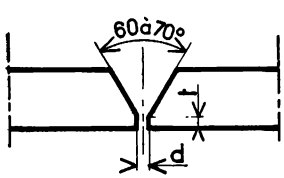


Fig. 35

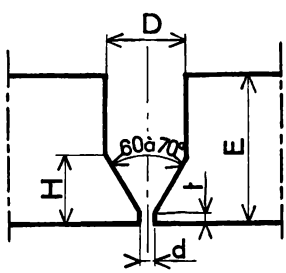


Fig. 36

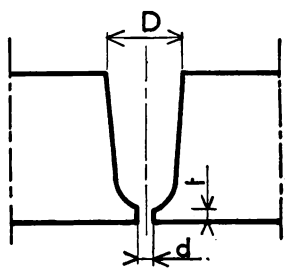


Fig. 37

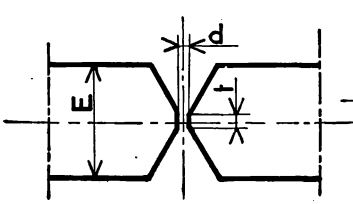


Fig. 38

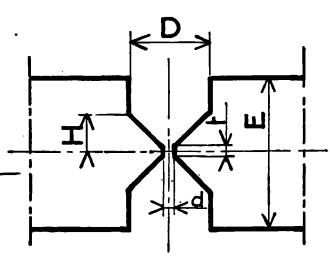


Fig. 39

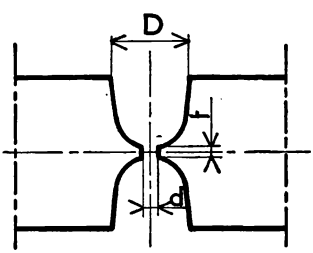


Fig. 40

Réalisation des chanfreins: ils s'obtiennent de différentes façons (voir chapitre rivetage). Ils se font de plus en plus par oxycoupage. Sur les machines modernes à guidage magnétique ou, mieux encore, à guidage par cellule électronique suivant un dessin, on emploie fréquemment plusieurs chalumeaux à déplacements synchronisés (fig. 41). Un chalumeau, muni d'une buse spéciale, permet d'obtenir directement des chanfreins en J ou en tulipe.

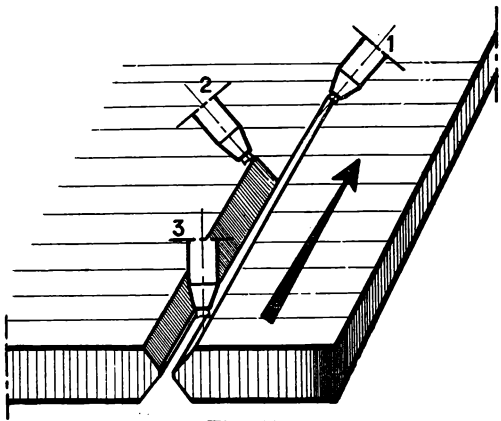


Fig. 41
Chanfrein en X exécuté par 3 chalumeaux décalés entre eux.

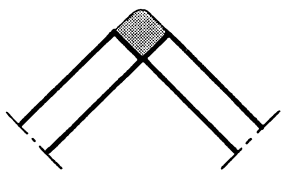


Fig. 42
Chanfrein naturel.

2° **Soudure sur angles extérieurs.** — Les épaisseurs inférieures à 10 *mm* peuvent se souder sans préparation (fig. 42) ; pour les épaisseurs supérieures on fait un chanfrein sur une ou sur les deux tôles, ce qui diminue la quantité de métal d'apport (fig. 43 à 46).

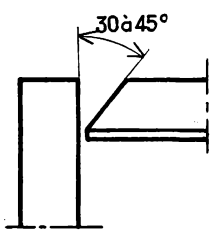


Fig. 43
Au-dessus de 10 mm

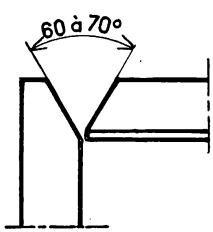


Fig. 44

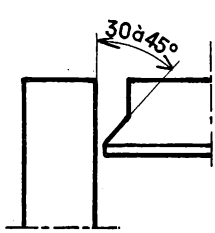


Fig. 45
Tôles très épaisses.

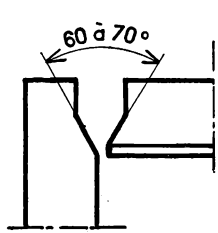


Fig. 46

3° **Soudure sur angles intérieurs.** — Elle se fait sans aucune préparation ou avec chanfrein si l'on désire réduire le cordon apparent (fig. 47 et 48).

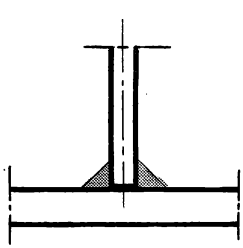


Fig. 47
Chanfrein naturel.

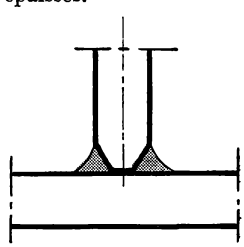


Fig. 48
Réduction du cordon apparent.

4° **Soudure sur clins.** — Semblable à la précédente, elle est simple ou double, avec ou sans épaulement (fig. 49 et 50).

Fig. 49
Clin simple.

Fig. 50
Clin épaulé.

5° **Soudure en bouchon.** — L'une des tôles à assembler est percée de place en place ; la soudure est exécutée dans les trous qui sont généralement bouchés entièrement (fig. 51). Les trous tronconiques (fig. 52) offrent l'avantage de faciliter le piquage du laitier.

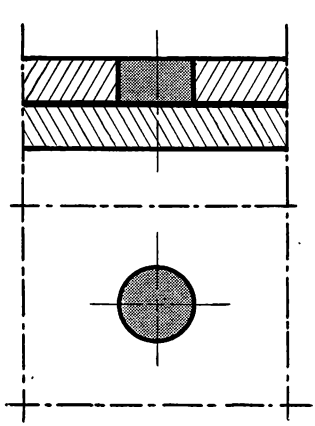


Fig. 51

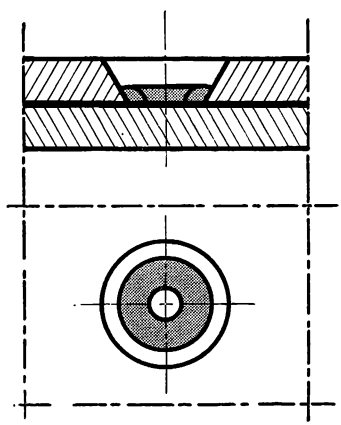


Fig. 52

Les bouchons de soudure remplacent les rivets aux endroits peu accessibles ; ils permettent la réalisation d'assemblages épais constitués par un grand nombre de tôles, c'est ainsi que les crochets de grandes poches de coulée pour fours Siemens-Martin sont exécutés par assemblage de 18 tôles d'acier allié (fig. 53).

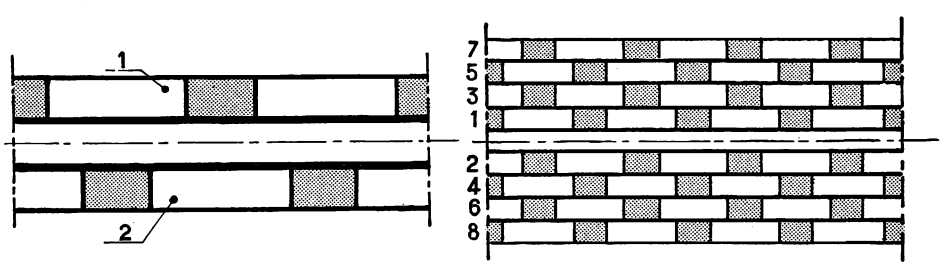


Fig. 53
La tôle 1 est soudée, puis la tôle 2, la tôle 3, et ainsi de suite.

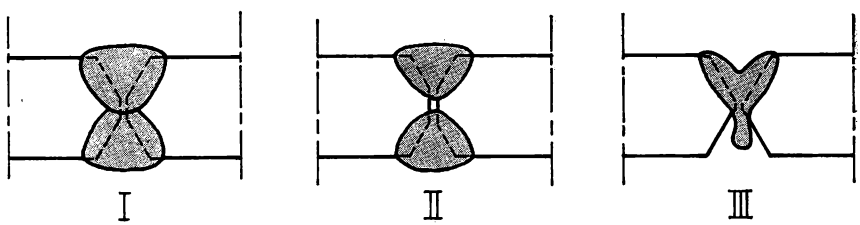
REMARQUE. — La préparation des bords à souder doit être exécutée avec beaucoup de soin, car elle a une incidence considérable sur le résultat du soudage, tant aux points de vue qualité que prix de revient.

Par exemple, un chanfrein trop important peut augmenter le volume de métal déposé, dans un rapport qui peut atteindre 100 %.

Les irrégularités de chanfrein entraînent des irrégularités dans le cordon de soudure, provoquant des différences de dilatation et de retrait et subséquemment des tensions internes, déformations, criques ou cassures.

Si un soudeur qualifié peut, dans une certaine mesure, remédier à une mauvaise préparation des joints, une machine automatique de soudage ne le peut pas.

EXEMPLE. — *Les caractéristiques de soudage mécanique étant invariables*, si, par endroit, le talon augmente de dimension, il y a manque de pénétration (fig. 53 bis II) ; au contraire, lorsque le talon diminue ou disparaît, il y a risque d'effondrement de la soudure (fig. 53 bis III).



Chanfrein régulier. Méplat trop grand. Méplat trop petit.

Fig 53 bis

LES MÉTHODES MODERNES DE SOUDAGE

1° **Soudage en surintensité:**

a) en augmentant l'intensité de 25 à 30 % et en faisant usage d'électrodes dont l'enrobage, plus réfractaire, résiste à cette intensité, on augmente à la fois la pénétration et la rapidité d'exécution de la soudure ;

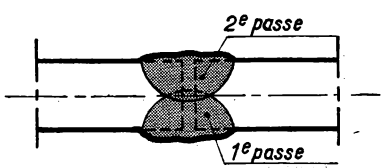


Fig. 54

b) avec une intensité de 50 à 60 % supérieure à l'intensité normale et des électrodes « *à grande pénétration* », on peut supprimer la préparation des bords jusqu'à 16 *mm* d'épaisseur. La soudure se fait généralement en deux passes (fig. 54).

2° **Électrodes à grand rendement,** nommées ainsi parce que le poids de métal déposé par fusion est supérieur (de 1,2 à 1,8) à celui de l'âme de l'électrode: ce résultat est obtenu par addition de poudre de fer dans l'enrobage qui conserve ses caractéristiques spécifiques (basique, acide, rutile).

En plus de cet avantage :

— elles diminuent la consommation de courant par poids de métal déposé ;

— la vitesse de soudage étant plus élevée, l'échauffement est plus localisé, les déformations sont moindres ;

— la soudure a un bel aspect et ne présente pas de difficultés opératoires (arc doux, peu de projections).

Inconvénients :

Jusqu'à 120% de rendement elles sont utilisables en toutes positions ; au-dessus de 130% de rendement le volume important du bain de fusion rend la soudure « en position » difficile.

L'épaisseur de l'enrobage, d'autant plus importante que le rendement augmente, rend la soudure dans des angles vifs difficile et la pénétration risque d'être insuffisante.

RECHARGEMENT DE PIÈCES A L'ARC ÉLECTRIQUE

Cette opération se pratique fréquemment pour réparer des pièces usées, supprimer des défauts de fonderie ou rapporter une couche de métal de nuance autre que celle de la pièce.

Les électrodes sont normalement constituées par le métal ou l'alliage de rechargement. On emploie généralement l'enrobage basique qui favorise le maintien des éléments utiles de l'enrobage dans le métal déposé.

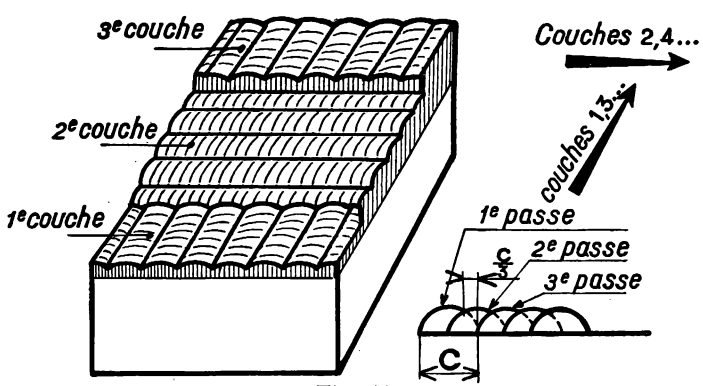


Fig. 55

Avec les électrodes à enrobage basique, on emploie de préférence le courant continu en plaçant la polarité positive à l'électrode.

On recharge soit par la méthode des passes étroites en déposant deux couches de métal, ou plus, mais toujours de façon que les passes d'une couche soient perpendiculaires à celles de la couche précédente (fig. 55) ;

soit par passes étroites et larges alternées; on commence par les passes étroites convenablement espacées entre elles et l'on continue en remplissant les intervalles par des passes larges (fig. 56).

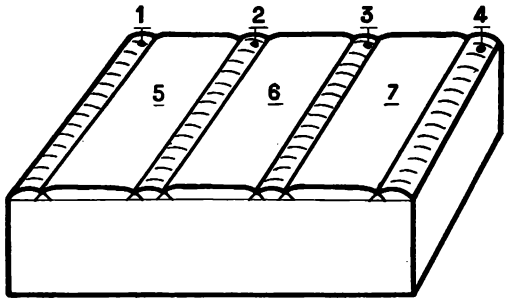


Fig. 56

Les passes larges 5, 6, 7, chevauchent les passes étroites 1, 2, 3, 4 pour obtenir une surface aussi lisse que possible.

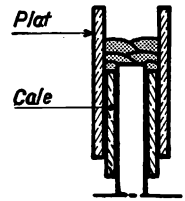


Fig. 57

Plats et cales sont en cuivre.

REMARQUE. — Le rechargement d'une tôle sur chant est facilité par le montage représenté figure 57.

LE SOUDAGE A L'ARC DES ACIERS GALVANISÉS

La présence du zinc n'est d'aucun effet lorsque l'on soude entre eux des aciers galvanisés.

Il est permis d'assurer que sous l'effet de l'arc électrique, le zinc se volatilise instantanément, avant même que le métal de base entre en fusion, ce qui explique qu'il n'y ait aucune inclusion d'oxyde de zinc.

Des essais de traction, de résilience de différents types de joints ont révélé des caractéristiques mécaniques au moins égales à celles des échantillons de base.

Les électrodes à enrobage *rutile-cellulosique* permettent d'obtenir des joints dont la compacité est meilleure que celle obtenue avec les électrodes à enrobage *basique*.

Reconditionnement des cordons de soudure

Trois procédés peuvent être employés pour reconstituer la couche de zinc éliminée pendant le soudage:

1° application d'une *peinture riche en zinc* (95 % minimum) après brossage énergique ;

2° application à 300 °C environ d'un *eutectique zinc-cadmium*, après brossage;

3° *métallisation au zinc* après sablage.

Soudage avec électrodes couchées

1 — PROCÉDÉ ELIN HAFERGUTH

L'électrode est couchée sur le joint et maintenue dans la rainure d'un moule en cuivre qui guide l'arc (fig. 58). Les électrodes sont disposées bout à bout (les extrémités ne doivent pas être dénudées). Après amorçage de l'arc, toutes les électrodes fondent successivement sous le guide en cuivre.

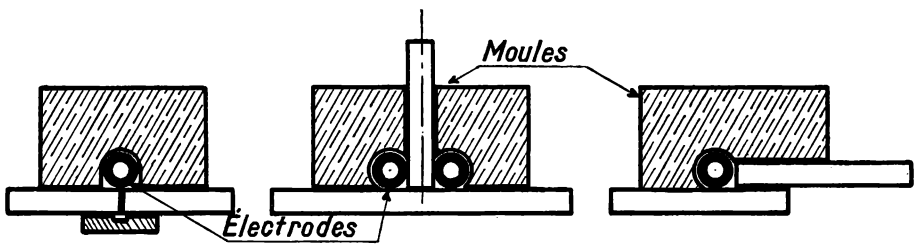


Fig. 58

2 — SOUDAGE AVEC ÉLECTRODES COUCHÉES SOUS FLUX

Procédé semblable au précédent, mais le moule en cuivre, adapté à chaque type d'assemblage et refroidi pendant les fabrications en série, est remplacé par une matière pulvérulente ou granuleuse formant voûte au-dessus de l'arc et assurant son guidage. On emploie notamment un mélange de sable de rivière et de 5 à 8 % en poids de silicate de potassium à 31° B.

On emploie actuellement des électrodes enrobées de 2 à 8 *mm* de diamètre. L'extrémité de chaque électrode est préparée pour permettre l'amenée de courant. L'extrémité peut être simplement coudée ; il est préférable, pour éviter l'excès de métal déposé à chaque extrémité d'électrode, de souder par deux points une plaque triangulaire en tôle de 2,5 *mm* d'épaisseur (fig. 59).

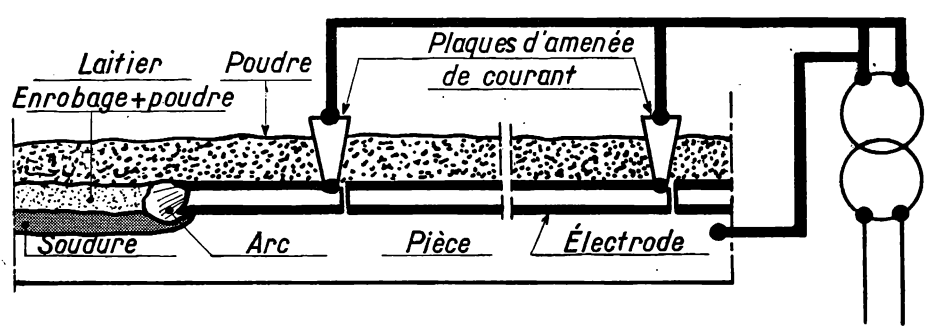


Fig. 59

Chaque plaque est serrée dans une pince d'amenée de courant ; l'ensemble des pinces est suspendu à une barre collectrice réunie à un pôle du générateur de soudage.

Toutes les électrodes, placées les unes à la suite des autres avec un intervalle de 1 à 2 *mm*, sont recouvertes de flux et mises sous tension. L'amorçage de la première se fait à l'aide d'un fil d'acier qui établit le contact entre l'extrémité de l'âme de l'électrode et la pièce à souder.

Lorsque l'arc atteint la plaque d'amenée de courant de la première électrode, il en fond la partie inférieure, l'arc s'éteint sur la plaque et jaillit sur l'extrémité de l'électrode suivante échauffée par le bain de fusion. L'amorçage se fait ainsi successivement d'une électrode par l'autre. La fusion se poursuit sans intervention extérieure.

Avantages du procédé : la pénétration est semblable à celle obtenue en soudage manuel. En effet, si la position couchée de l'électrode est défavorable à la pénétration car elle ne permet pas de bénéficier de l'effet dynamique de l'arc, l'emploi d'intensités élevées (60 à 80 ampères par *mm* de diamètre contre 40 *A* pour le soudage manuel) compense largement cet inconvénient.

L'intensité élevée provoque une fusion plus rapide.

Il est possible de disposer deux ou trois électrodes côte à côte et de faire plusieurs passes successives.

Pour l'exécution de joints de grandes longueurs, un *seul opérateur peut faire fonctionner plusieurs postes de travail.*

Le soudage sous flux électro-conducteur

C'est un procédé de soudage électrique caractérisé par l'emploi d'une électrode nue et d'une poudre spéciale, nommée ***flux électro-conducteur,*** qui joue un rôle électrique et métallurgique.

Le dépôt du flux précède l'électrode et recouvre son extrémité. Sous l'effet du courant, la poudre s'échauffe et fond en donnant un laitier.

La chaleur qui provoque la fusion de l'électrode et des bords de la pièce à souder est dégagée à la fois par *effet d'arc et par effet Joule* dû au laitier qui, chaud, est conducteur (fig. 60).

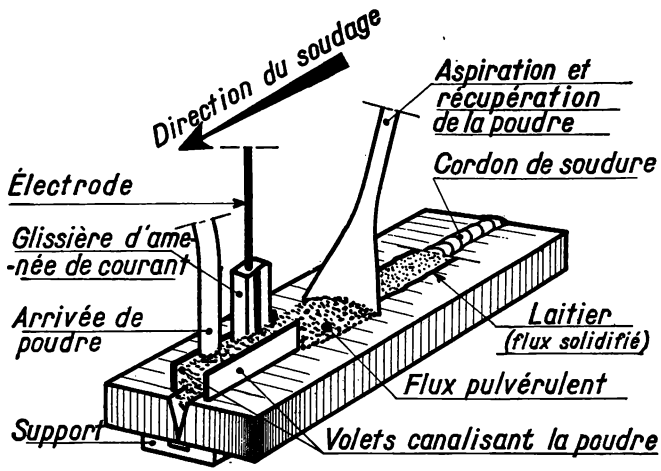


Fig. 60

Schéma de principe du soudage sous flux électro-conducteur.

Au début, on amorce la fusion de la poudre, isolante à froid, en interposant entre la pièce et l'électrode un tampon de laine d'acier qui s'échauffe très rapidement au passage du courant.

Dès qu'un bain de flux est constitué, l'extrémité de l'électrode et le métal sous-jacent de la pièce entrent en fusion.

L'extrémité de l'électrode et l'arc sont cachés par le flux et l'excès de poudre qu'il est nécessaire de maintenir au-dessus de la soudure, c'est pourquoi ce procédé est nommé également ***soudage en arc submergé.***

AVANTAGES DU PROCÉDÉ

Grande rapidité d'exécution grâce à la possibilité d'utiliser des intensités élevées (jusqu'à 4 000 ampères) tout en conservant un bain de fusion très calme.

REMARQUE. — Actuellement, on dépasse rarement 2 000 ampères, car dans beaucoup de réalisations, les intensités élevées, en présence des tensions de bridage, fournissent des assemblages peu ductiles.

Excellentes propriétés mécaniques des joints dues à l'*emploi du flux* qui provoque des échanges chimiques avec le métal à souder, élimine les impuretés, protège le bain du contact de l'atmosphère et ralentit le refroidissement de la soudure.

Pouvoir de pénétration élevé puisque le bain de fusion est constitué généralement par *2/3* environ de métal venant des pièces à souder et par *1/3* seulement de fil électrode.

Les chanfreins sont réduits et parfois supprimés jusqu'à une épaisseur de 15 *mm*.

Faibles déformations en raison du peu de dispersion de chaleur dans les zones voisines du joint.

L'énergie électrique consommée pour effectuer une soudure n'est environ que le tiers de celle qui serait nécessaire pour réaliser la même soudure au moyen de l'arc électrique seul.

Tous les aciers, doux, à teneur en carbone assez élevée (0,3 % et plus), spéciaux, inoxydables, sont soudables par ce procédé. Le soudage des aciers fragiles ou très épais (200 *mm* et plus) est également réalisable en prenant quelques précautions (préchauffage vers 250, 300 °C, chauffage en cours de soudage, post-chauffage et traitement thermique de détensionnement à 650 °C.).

Toutes les formes de joints sont admissibles, mais le procédé n'est pratiquement utilisable, que sur joints horizontaux ou faiblement inclinés.

INCONVÉNIENTS

Il est indispensable d'adapter très exactement le métal d'apport et la poudre au métal de base.

La préparation des joints est souvent longue; ceux-ci doivent être réguliers, bien propres (décapage chimique des tôles minces afin d'éliminer les traces de rouille, la graisse, les poussières, etc.).

Il faut prévoir un soutien à l'envers bien adapté à la nature des pièces: soutien en cuivre ou, mieux, par le flux lui-même (fig. 61).

La détermination des paramètres de soudage (intensité, tension et vitesse de soudage), doit être faite avec précision.

Pour faciliter le démarrage et l'arrêt des soudures, il y a intérêt à prévoir des surlongueurs à chaque extrémité.

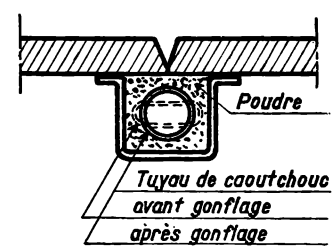


Fig. 61

Ce procédé n'est donc intéressant que pour le soudage de grandes longueurs ou le travail de série.

Enfin, les soudures n'offrent pas toujours une résilience suffisante.

La sensibilité à la fissuration des soudures croît avec l'intensité du courant et surtout avec la nature du métal de base; celui-ci doit être de qualité.

MATÉRIEL D'UTILISATION

Le matériel d'utilisation peut être entièrement automatique, semi-automatique ou manuel, alimenté soit par du courant continu, soit par du courant alternatif.

Le matériel automatique ou semi-automatique utilise du fil électrode enroulé en couronne et entraîné par un ensemble *moteur-réducteur de vitesse* contrôlé par un *régulateur* qui assure la rotation du galet d'entraînement du fil à une vitesse rigoureusement constante.

REMARQUE. — C'est la vitesse constante de déroulement du fil qui assure une longueur d'arc aussi constante que possible. En effet, la valeur de la tension varie avec la distance entre l'extrémité de l'électrode et la pièce à souder; si cette distance augmente, la tension augmente également cependant que l'intensité diminue, ce qui entraîne un ralentissement de la fusion du fil. Si la vitesse d'arrivée du fil est constante, son extrémité se rapprochera de la pièce et la tension, l'intensité et la longueur de l'arc redeviendront rapidement normales. Or, la constance de l'intensité et de la tension pendant toute la durée du soudage est indispensable pour réaliser une soudure d'aspect régulier et de pénétration continue.

1° **Le matériel automatique** comprend essentiellement une *tête automatique* qui alimente la soudure en métal d'apport; elle est montée sur un *support orientable* en hauteur et articulé autour d'un axe vertical. Le support est fixé sur un *chariot automoteur* qui peut être animé de vitesses variables (5 à 230 *cm/mn*) mais parfaitement régulières (fig. 62).

Ce matériel convient pour une utilisation intensive.

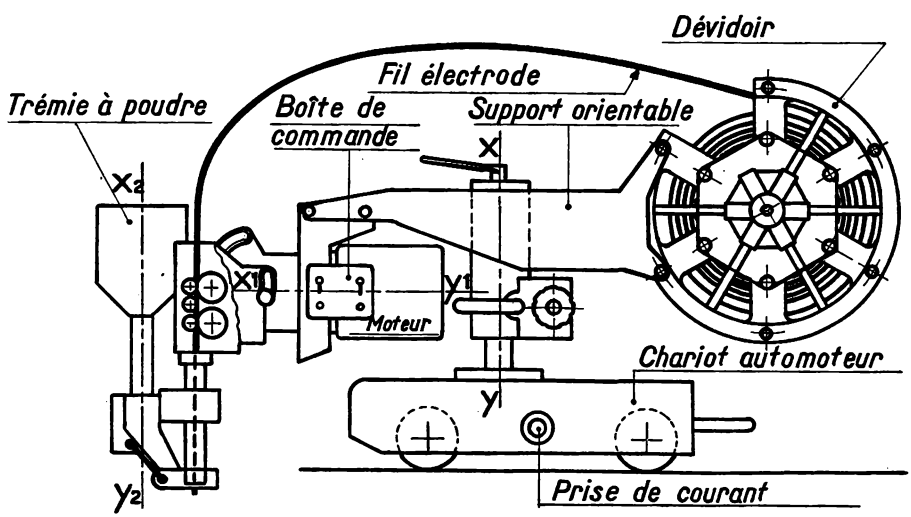


Fig. 62

Le support tourne autour de l'axe xy.
Le mécanisme commandant le fil et l'arrivée de poudre peut tourner autour de l'axe $x_1 y_1$.
Par un mouvement de bascule, l'axe $x_2 y_2$ peut s'incliner jusqu'à 45°.

2° **Le matériel semi-automatique** est constitué essentiellement par une ***lance soudeuse*** manipulée par le soudeur, et *alimentée automatiquement* en fil électrode et en flux (fig. 63).

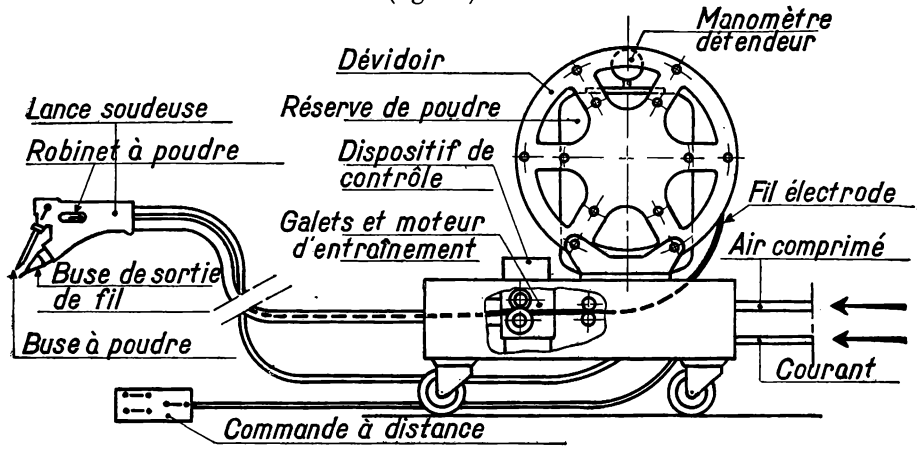


Fig. 63

La poudre est acheminée du réservoir à la lance par air comprimé.

D'un emploi plus universel que les grosses machines entièrement automatiques, il permet l'assemblage de pièces présentant des formes irrégulières ou des zones peu accessibles.

3° **Le matériel manuel,** très simple, est constitué par un appareil léger qui se déplace sur la pièce à souder. Il est muni d'un ***entonnoir à poudre*** et utilise des électrodes droites. Déplacement de l'appareil et avance des électrodes sont obtenus facilement par la manœuvre de la poignée.

APPLICATION DU SOUDAGE SOUS FLUX ÉLECTRO-CONDUCTEUR AU RECHARGEMENT ET AU PLACAGE INOXYDABLE PAR LE PROCÉDÉ « RUBAN ARC SUBMERGÉ »

Principe. — Il consiste à déposer un métal d'apport amené dans l'arc sous forme d'un *ruban* au lieu d'un fil.

On emploie le matériel automatique. La machine peut être alimentée en courant continu ou en courant alternatif.

On utilise fréquemment des rubans de 60 *mm* de largeur, mais cette largeur peut varier de 20 à 100 *mm*.

L'arc, *oscillant*, voyage continuellement et très rapidement d'un bord à l'autre du ruban. La pénétration est comprise entre 1 et 1,5 *mm* pour une intensité de 800 à 900 ampères et 2 *mm* pour une intensité de 1 300 à 1 400 *A*. A intensité égale, la vitesse de dépôt, c'est-à-dire le poids de métal déposé par unité de temps, est environ double de celle des autres procédés.

Applications. — Pour les rechargements en acier *dur*, on emploie généralement des rubans en acier *doux ;* les éléments d'alliage sont apportés par le flux

qui contient soit des métaux purs, soit des ferro-alliages appropriés au résultat à obtenir (composition chimique et propriétés mécaniques du dépôt).

Les placages en acier inoxydable sont réalisés au moyen de rubans en acier inoxydable 18/10 qui, après dépôt, compte tenu des éléments brûlés dans l'arc et de la dilution, permettent d'obtenir des dépôts en 18/8. On peut également obtenir d'autres compositions, par exemple du 18/8 plus molybdène ou du 25/12 et même 25/20.

Soudage sous laitier électro-conducteur dit « électro-slag »

Ce procédé, mis au point en U.R.S.S. pourrait se traduire par ***soudage en lingotière.*** Le métal de base et le fil électrode sont fondus dans un moule constitué d'une part par les tôles à assembler et d'autre part par deux supports en cuivre refroidis à l'eau (fig. 63 bis).

Le bain de laitier en fusion, obtenu par adjonction de flux en poudre, protège le métal liquide de l'atmosphère ambiante. Dans certaines machines le laitier en poudre est remplacé par un flux gazeux tel que le gaz carbonique.

Pour exécuter une soudure verticale, la passe de fond est assurée «par un élément de tôle horizontal sur lequel on dépose du flux. Un arc éclate au début de l'opération mais il s'éteint dès que le bain de flux s'élève ; à ce moment le courant traverse le flux pour passer de l'électrode à la tôle.

L'échauffement a lieu uniquement par effet Joule (le laitier atteint une température de 2 000 °C). *Ce n'est plus un procédé de soudage à l'arc, c'est un procédé de soudage par résistance.*

La machine monte en entraînant les supports en cuivre à la vitesse de soudage. Cette vitesse est sensiblement constante (1,5 *m/heure*) quelle que soit l'épaisseur à souder car, en fonction de cette épaisseur, on multiplie le nombre de fils-électrodes de 3,2 *mm* de diamètre sous 600 à 800 *A*.

EXEMPLES : 1 fil pour $e \leqslant 60$ *mm* ; 2 fils pour $e = 60$ à 100 *mm* ; 3 fils pour $e = 100$ à 150 *mm* ; 9 fils pour $e = 450$ *mm*.

Pour régulariser le lit de fusion, le ou les fils-électrodes sont animés d'un mouvement oscillatoire horizontal.

En multipliant le nombre de fils-électrodes, on soude *en une seule passe* des épaisseurs très importantes. Il est ainsi possible d'assembler de volumineux éléments, en acier coulé ou forgé, pour réaliser des ensembles de masse pratiquement illimitée. Le record actuel d'épaisseur soudée est de l'ordre de 2 mètres.

La préparation est sans chanfrein. Les bords sont écartés de 25 à 30 *mm* pour $e = 40$ à 100 *mm* et de 30 à 35 *mm* pour $e = 100$ à 150 *mm*.

On utilise du courant alternatif pour éviter l'électrolyse du laitier.

Du fait de la simplification de la préparation de l'assemblage, de la facilité et de la rapidité du soudage, l'électro-slag est un procédé d'assemblage de grande productivité.

Le début de la soudure présente des défauts importants: manque de fusion et soufflures ; à l'extrémité de la soudure, pendant la solidification, il se produit

une retassure. Pour éviter ces défauts il faut prévoir à chaque extrémité du joint un appendice (surlongueur).

Le joint obtenu est sain mais très hétérogène. Le long séjour du métal à température élevée rend le grain très grossier à la périphérie de la zone fondue.

Les caractéristiques de résilience sont particulièrement faibles au cœur de la soudure, plus faibles que celles de la zone surchauffée, ce qui constitue une anomalie.

La présence d'une zone très hétérogène aux points de vue structure et caractéristiques mécaniques diminue fortement l'aptitude du joint à résister à la rupture fragile. Cette aptitude est améliorée par un recuit de normalisation au dessus de 925 °C.

Ce procédé de soudage est applicable à l'aluminium et aux cupro-aluminiums.

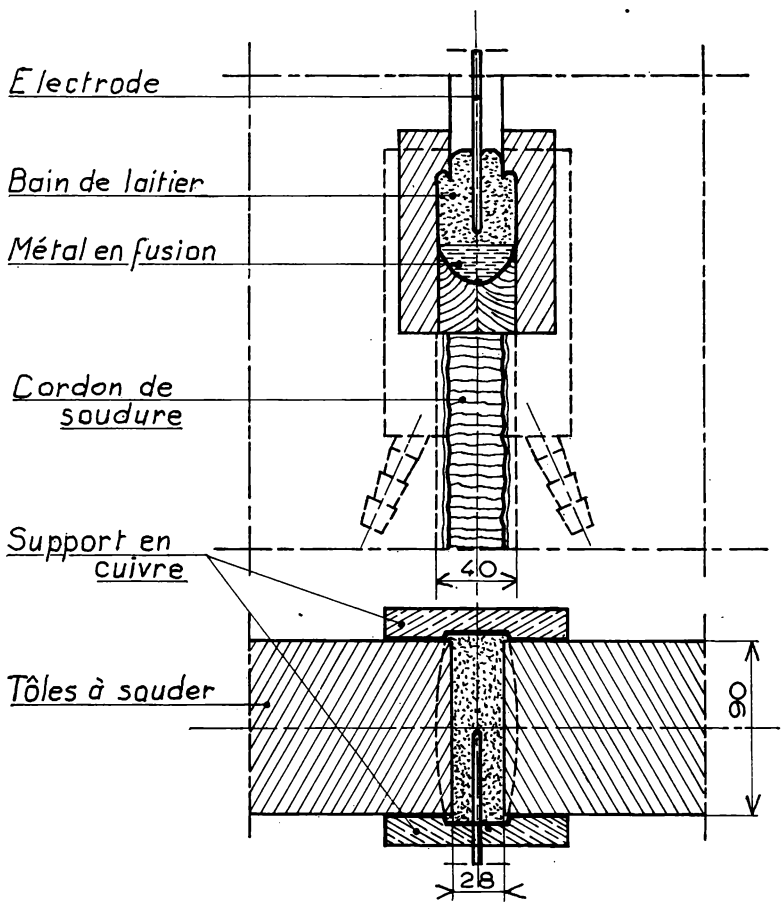


Fig. 63 bis

Diagramme du soudage en lingotière monopasse vertical.

Le soudage électrique à l'hydrogène atomique

PRINCIPE

L'arc électrique, qui jaillit entre les électrodes de tungstène d'un chalumeau appelé torche, est enveloppé par un jet d'hydrogène.

A la température de l'arc, l'hydrogène moléculaire se dissocie en ses deux atomes avec absorption de chaleur. Au contact de la pièce à souder l'hydrogène atomique se retransforme en hydrogène moléculaire avec restitution de chaleur: la température atteint 3 700 degrés C.

UN POSTE DE SOUDAGE A L'HYDROGÈNE ATOMIQUE COMPREND ESSENTIELLEMENT

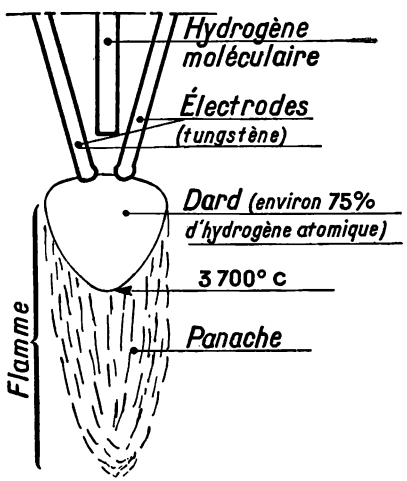


Fig. 64

un poste producteur et régulateur de courant de soudage ;

une bouteille d'hydrogène comprimé ;

une torche de soudage, manuelle ou montée sur machine, à deux ou trois électrodes selon que l'arc est monophasé (fig. 64) ou triphasé.

PROPRIÉTÉS ET EMPLOIS DE LA FLAMME D'HYDROGÈNE ATOMIQUE

Le soudage à l'hydrogène atomique présente les avantages ci-après:

— concentration de la chaleur en un faible espace ;

— température très élevée qui permet la fusion des métaux réfractaires :

— grand pouvoir réducteur (réduction des oxydes de chrome pendant le soudage des aciers inoxydables) et protection du métal en fusion contre l'action de l'air;

— absence d'action mécanique sur les corps fondus: la fusion est calme et donne une soudure particulièrement lisse.

Ces qualités sont très appréciées pour le soudage des aciers spéciaux, de l'aluminium et de ses alliages, des métaux cuivreux, du monel.

Cependant, ce procédé n'est que rarement mis en œuvre, car il est d'un prix de revient élevé en raison de l'usure rapide des électrodes très coûteuses, et de la préparation spéciale et précise des bords; en outre, la tension de soudage, relativement élevée (70 à 100 *V*), peut être dangereuse lorsque, dans le cas où un métal d'apport est employé, celui-ci touche les électrodes (tension d'amorçage: 300 volts.).

Les procédés plus récents de soudage à l'arc électrique en atmosphère d'argon ou de CO_2 ont diminué considérablement l'intérêt du soudage à l'hydrogène atomique.

Le soudage électrique en atmosphère inerte

PRINCIPE

L'arc électrique et le métal fondu sont isolés de l'atmosphère extérieure par un gaz inerte. Ce gaz assure une complète protection contre l'action de l'oxygène et de l'azote de l'air sans présenter les inconvénients dus aux autres moyens employés pour assurer cette protection (laitiers des électrodes enrobées, flux décapants pour soudage oxyacétylénique).

Les gaz employés sont :

— ***l'argon*** (1) extrait de l'air (en volume : 0,94 %) ; 1 litre d'argon a une masse de 1,78 *g*.

— ***l'hélium,*** extrait des gaz naturels des pétroles ; 1 litre d'hélium a une masse de 0,178 *g*.

L'argon est le plus couramment utilisé, notamment en France, en raison de son approvisionnement plus facile que celui de l'hélium. On emploie aussi, mais plus rarement, le mélange ***argon-hélium***. Parfois on ajoute à l'argon une très faible quantité de gaz actif pour modifier le comportement du bain de fusion et éviter divers défauts ; c'est ainsi que pour le soudage des aciers inoxydables *18/8*, une addition de *1* % d'oxygène améliore la stabilité de l'arc et la régularité des dépôts tout en évitant, surtout en soudure d'angle, les caniveaux. Pour le soudage des aciers doux une addition de *3* % ***d'oxygène*** donne de bons résultats.

(1) de *a*, privatif et du mot grec *ergon*, travail ; parce qu'il est neutre, ne provoque aucune réaction, ne fournit aucune énergie chimique.

Le gaz inerte remplit plusieurs rôles :

électrique : il améliore la stabilité de l'arc et facilite son allumage ;

physique : il isole parfaitement la zone de soudage ;

chimique : étant neutre, il n'exerce aucune action sur le métal en fusion.

APPLICATIONS DU SOUDAGE A L'ARC ÉLECTRIQUE SOUS ARGON

Applicable à tous les métaux, il l'est surtout (en raison du prix encore élevé de l'argon) aux aciers spéciaux, aux aciers inoxydables, aux métaux et alliages légers, au cuivre (désoxydulé), au nickel et à leurs alliages, ainsi qu'aux rechargements en éléments spéciaux (stellites, crinites, etc.).

LES PROPRIÉTÉS DES SOUDURES RÉALISÉES SONT EXCELLENTES

L'arc électrique est stable et très doux, il produit un bain de fusion calme qui confère aux soudures un bel aspect ; il est possible de souder en toutes positions (verticale de haut en bas).

Les caractéristiques mécaniques sont élevées : compacité remarquable des cordons (soufflures exceptionnelles).

La perte par volatilisation d'éléments d'addition tels que le magnésium sur *AG*3 ou *AG*5 *est pratiquement nulle*, alors qu'elle est sensible en soudage oxyacétylénique.

Comme la zone de chaleur est très concentrée, les perturbations d'ordre thermique dans le métal de base sont faibles, les *zones recuites sont étroites et les déformations minimes, la rapidité d'exécution est augmentée.*

Autres avantages : le métal d'apport n'étant pas enrobé, il n'y a pas formation de laitier, d'où aucun risque d'inclusion et suppression du piquage.

Les métaux et alliages légers sont soudés sans flux, ce qui supprime le risque de corrosion et permet l'emploi de tous les types de joints.

L'absence de laitier ou de flux permet au soudeur de percevoir constamment et avec netteté la fusion du métal.

Il n'y a aucun dégagement de fumées ou de vapeurs nocives.

Il est très facile d'employer le procédé sur machines automatiques.

LE SOUDAGE SOUS ATMOSPHÈRE D'ARGON EST RÉALISÉ DE DEUX FAÇONS

1° **Avec électrode réfractaire :** *procédé TIG* (T = tungstène, I = inerte, G = gaz) ; l'électrode en tungstène (pur ou thorié à 1 ou 2 % de thorium) ne sert qu'à établir et à maintenir l'arc électrique, elle ne s'use que très faiblement. S'il est nécessaire de faire un apport de métal, il se fait au moyen de baguettes comme en soudage oxyacétylénique.

2° **Avec électrode consommable :** *procédé MIG* (M = métal, I = inerte, G = gaz) ; l'électrode est constituée par le métal d'apport.

LES POSTES DE SOUDAGE AVEC ÉLECTRODE RÉFRACTAIRE SE COMPOSENT (fig. 65) :

a) d'un **générateur** de courant de soudage :

— ***rotatif,*** il fournit du *courant continu* recommandé pour le soudage des aciers (doux, inoxydables, réfractaires), du cuivre, du nickel et de leurs alliages, en branchant le pôle négatif à l'électrode ;

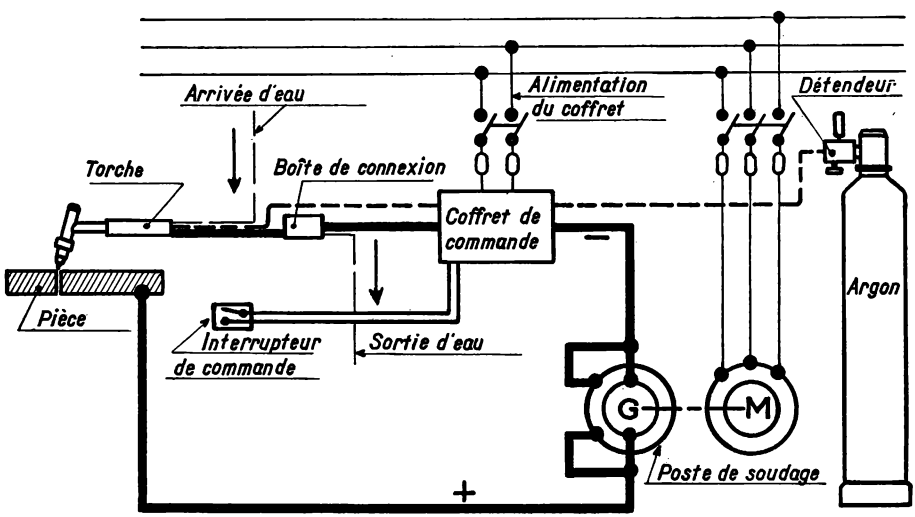


Fig. 65
Schéma d'installation d'un poste de soudage en courant continu.

— ***statique à cellules redresseuses au sélénium*** qui donne également un *courant se rapprochant du courant continu* (courant unidirectionnel) ;

— ***statique*** qui fournit du *courant alternatif,* recommandé pour le soudage des métaux et alliages légers. Ce poste est complété par un ***générateur à étincelle pilote,*** producteur de courant à haute fréquence, qui donne à l'étincelle jaillissant entre l'électrode et la pièce la propriété d'ioniser l'atmosphère ;

b) **d'une torche de soudage** qui maintient l'électrode et assure l'écoulement de l'argon. Elle comporte, en général, une circulation d'eau destinée à refroidir les pièces exposées aux radiations de l'arc ;

c) **d'une bouteille d'argon** contenant 10 mètres cubes de gaz comprimé à 150 *bars*. L'ogive est peinte en jaune. Sur le raccord de sortie de la bouteille se monte un détendeur muni d'un débitmètre ;

d) **de conducteurs souples de courant et de gaz;**

e) **d'un coffret de commande** qui assure automatiquement les opérations d'ouverture et de fermeture d'arrivée de l'argon, l'allumage et l'extinction de l'arc avec une temporisation réglable. A défaut de coffret, on installe un *économiseur d'argon* assez semblable à l'économiseur employé en soudage oxyacétylénique.

REMARQUE. — Le coffret de commande, complété par une *gâchette de commande* montée sur la torche, a pour but de faire circuler l'argon avant l'amorçage et après la coupure de l'arc jusqu'au moment où l'électrode est suffisamment refroidie pour pouvoir être exposée à l'air sans risque d'oxydation (20 à 30 secondes).

La torche est maintenue sur la pièce pendant l'écoulement de l'argon afin d'éviter l'oxydation du bain de soudure encore chaud.

LA TECHNIQUE OPÉRATOIRE

La préparation des bords à souder influe sur la qualité de la soudure et sur sa vitesse d'exécution. Le métal de base et la baguette d'apport doivent être dégraissés soigneusement; pour l'aluminium et ses alliages on emploie le trichloréthylène ; la pellicule d'oxyde est enlevée immédiatement avant soudure par brossage ou grattage.

On n'effectue le pointage que s'il est indispensable, l'emploi de montages maintenant les joints en position est préférable: « traversé » plus régulier, moindre dépense d'argon, moindres déformations, vitesse accrue.

Il faut protéger l'envers des soudures bord à bord de l'action de l'air: cette protection est généralement assurée par un support-écran en cuivre (fig. 66) ou,

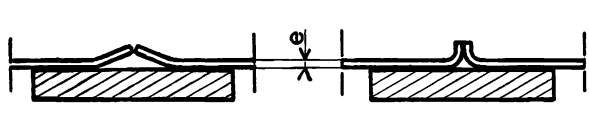


Fig. 66

e < 2
Soudage sur bords relevés.

Soudage bord à bord.
a = 4 à 10
b < e

dans le cas d'accès impraticable, par un gaz non oxydant (argon, hydrogène, azote sec). La figure 67 indique le montage recommandé pour le soudage de l'acier doux. Les figures 68 à 71 indiquent la préparation pour la soudure bord à bord d'acier inoxydable.

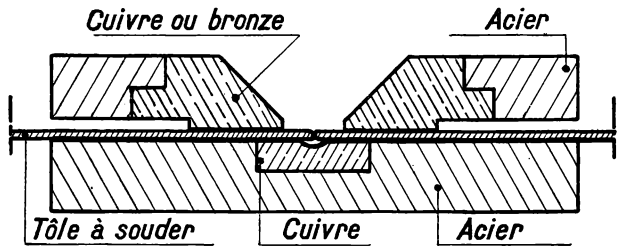


Fig. 67

On emploie un métal non magnétique: cuivre ou bronze, pour éviter toute instabilité de l'arc.

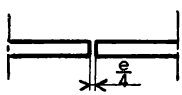


Fig. 68

$2 < e < 5$

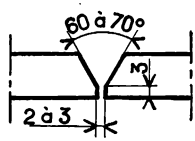


Fig. 69

$6 < e < 12$

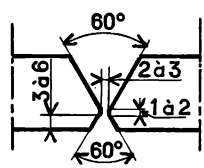


Fig. 70

$e > 12$

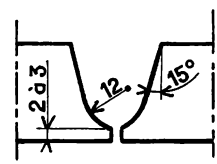


Fig. 71

$e > 12$ envers inaccessible

Soudage manuel. — Il se pratique comme le soudage au chalumeau. La torche est déplacée de droite à gauche en maintenant une longueur d'arc constante.

La technique opératoire varie un peu suivant le métal:

L'aluminium et ses alliages se soudent en imprimant à la torche un mouvement d'avance (3 à 5 *mm*) et de recul, la baguette est déplacée pareillement, tout en restant dans le jet d'argon. Le mouvement d'avance a pour but de décaper la zone située en avant du bain de fusion.

L'acier inoxydable se soude en déplaçant la torche régulièrement sans mouvement oscillant, le métal d'apport est animé d'un mouvement de va et vient de petite amplitude (1,5 *mm* environ), afin de rester constamment dans le jet d'argon, mais il n'est pas maintenu dans le bain.

Sur ***le magnésium,*** le métal d'apport reste toujours en contact avec le métal de base ; l'arc est maintenu très court.

Soudage à la machine. — Dans certains dispositifs, la torche, montée sur un support, est déplacée le long du joint ; dans d'autres, elle est fixe, et c'est la pièce qui se déplace.

Les installations de soudage automatique, fort simples, permettent d'accroître considérablement la rapidité d'exécution. Les tableaux ci-dessous donnent quelques éléments de réglage concernant le soudage des aciers doux calmés et aciers inoxydables.

Acier doux, joint bord à bord

Soudage manuel					Soudage machine				
Épaisseur *mm*	Intensité *Ampères*	Diamètre du métal d'apport *mm*	Débit d'argon *litres/mn*	Vitesse *cm/mn*	Épaisseur *mm*	Intensité *Ampères*	Diamètre du métal d'apport *mm*	Débit d'argon *litres/mn*	Vitesse *cm/mn*
0,7	60-70	—	4	30-40	0,7	95	—	5	65
1,25	100	1,6	4	30-40	1,25	118	—	5	65
1,5	120	1,6	4	30-40	1,5	125-130	—	5	65
2	130	1,6	5	30-40	2	150	—	6	70

Acier inoxydable, joint bord à bord

Soudage manuel					Soudage machine sans métal d'apport			
Épaisseur *mm*	Intensité *Ampères*	Diamètre du métal d'apport *mm*	Débit d'argon *litres/mn*	Nombre de passes	Épaisseur *mm*	Intensité *Ampères*	Débit d'argon *litres/mn*	Vitesse *cm/mn*
0,6	25-30	—	4	1	0,6	50	5	75
1	70	—	4	1	0,8	60	5	60
2	100	1,5	4	1	1	80	5	70
4	175	3	5	1	1	135	5	140
6	300	4	5	2	1,5	110	5	60
12	400	6	6	2 et 1 à l'env.	2	115	5	50

LE SOUDAGE PAR POINTS TIG (A ÉLECTRODE RÉFRACTAIRE)

La torche est remplacée par un pistolet de soudage assez semblable à celui que représente la figure 72.

L'arc électrique jaillit pendant un temps déterminé dans une atmosphère **d'argon**, entre une électrode (de préférence en tungstène thorié, afin de faciliter **l'amorçage**) et la pièce à souder. L'arc constitue une source de chaleur très concentrée qui permet une pénétration profonde (fig. 71 bis).

Ce procédé offre l'avantage de pouvoir souder par points des éléments accessibles d'un seul côté.

Il n'est pratiquement applicable qu'aux aciers doux ou faiblement alliés aux aciers inoxydables, au titane.

Il est notamment employé pour l'assemblage de tôles sur profilés et le placage d'acier inoxydable sur acier doux. Il peut s'exécuter dans toutes les positions, sous réserve que l'épaisseur de la tôle supérieure ne dépasse pas 1,8 *mm*.

C'est un procédé complémentaire du soudage par résistance (voir chapitre XI) mais moins rapide et d'un prix de revient plus élevé. Il peut, dans certains cas, remplacer avantageusement le soudage à l'arc en bouchons.

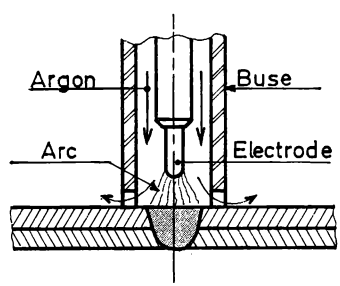


Fig. 71 bis

LES POSTES DE SOUDAGE AVEC ÉLECTRODE FUSIBLE

se composent de:

— **un poste rotatif** ou **un poste statique à redresseur de courant ;**

— **un pistolet de soudage,** généralement refroidi par eau, qui assure l'arrivée de l'argon, l'alimentation en courant de soudage du fil ainsi que son guidage (fig. 72) ;

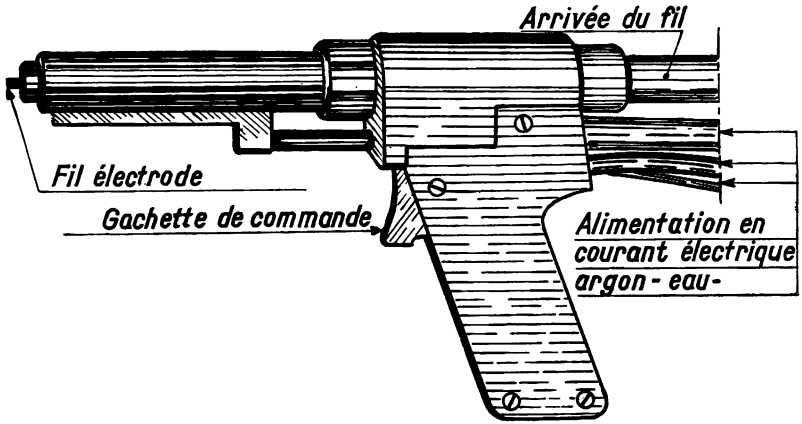


Fig. 72

— **un appareil moteur** qui alimente le pistolet en fil-électrode enroulé sur une bobine ;

— **un coffret de commande ;**

— **une bouteille d'argon** avec son détendeur-débimètre.

Le fil-électrode, déroulé à une vitesse constante, assure un arc de longueur constante; il est relié au *pôle positif*, ce qui échauffe considérablement l'électrode (projection d'électrons) et active sa fusion tout en assurant l'auto-régulation de l'arc.

Le transfert du métal d'apport (fil-électrode) à la pièce à souder n'est correct que si la densité de courant dans le fil est au moins égale à 80 A/mm^2 (elle peut atteindre 600 A/mm^2): ceci conduit à utiliser des fils de faible diamètre. Ainsi, pour un fil de $\varnothing = 3{,}2$ *mm*, une intensité de 400 *A* et une vitesse de déroulement du fil de 2,5 *m/mn*, le nombre de gouttelettes projetées du fil dans le bain de fusion est de 290 par seconde; chaque gouttelette est animée d'une vitesse de 9,6 *m/sec*. Ceci explique que le soudage sous argon avec électrode fusible est réalisable en toute position, notamment au plafond.

Le procédé (MIG) rend aisée l'exécution de travaux considérés comme difficiles en raison de l'épaisseur à souder ou de la position des soudures. Il permet d'abaisser notablement les temps de soudage.

EXEMPLE: soudage bord à bord sur acier inoxydable de 10 *mm* d'épaisseur.

Nombre de passes	Diamètre du fil électrode *mm*	Intensité *Ampères*	Vitesse de soudage *cm/mn*
2	1,6	340	40

Pour le soudage des aciers doux, on emploie couramment des mélanges de gaz dont le prix de revient est à peu près la moitié de celui de l'argon pur; ces mélanges sont désignés: Argon *V*, le symbole *V* indique que l'argon est accompagné d'un certain pourcentage d'oxygène et d'un cortège d'impuretés non gênantes pour ce soudage. La consommation de gaz varie entre 15 et 20 *l/mn*.

LE PROCÉDÉ « SHORT-ARC »

Le procédé *MIG* ordinaire ne permet pas de souder les tôles d'une épaisseur inférieure à 5 *mm*. Le procédé « **short-arc** » (*arc court*) plus récent, offre la possibilité de souder dans toutes les positions les aciers inoxydables, les aciers au carbone, l'aluminium et le cuivre de 0,8 à 2,5 *mm* d'épaisseur.

Dans ce procédé, qui exige une source de courant particulière à caractéristique de tension constante (*CPP*), l'arc se forme dans un champ de 30 à 125 ampères et de 14 à 19 volts.

La caractéristique de la source de courant et la faible tension font que le métal d'apport d'un diamètre de 0,75 *mm* et même 0,5 *mm*, ne tombe pas en pluie comme avec le soudage *MIG* normal, mais en grosses gouttes provoquées par une suite de courts-circuits successifs. Bien que le taux de métal déposé soit de l'ordre de 1,8 à 3,1 *kg/h* contre 4,5 à 5,4 *kg/h* dans le soudage classique *MIG*, l'apport de chaleur est trois fois moindre.

L'arc « *short-arc* » semble jaillir de l'extrémité d'une aiguille ce qui permet de contrôler facilement le processus de soudage et, par là, de souder de faibles sections dans toutes les positions.

L'argon est utilisé pour le soudage de la plupart des métaux ; cependant, pour le soudage des aciers au carbone et des aciers inoxydables, on peut utiliser des mélanges d'argon et d'oxygène ou d'argon et d'acide carbonique.

SOUDO-BRASAGE DE L'ACIER PAR LE PROCÉDÉ MIG

Grâce à l'apparition sur le marché de fils *cupro-aluminium* de faible diamètre (0,8 *mm*) et aux mélanges gazeux *argon-hélium*, il est possible de soudo-braser avec le procédé *MIG*.

On n'emploie ce procédé que pour le soudo-brasage de l'acier galvanisé et que dans les cas où le gain obtenu, grâce à la rapidité d'exécution, permet de compenser le prix élevé du métal d'apport.

Les résultats sont très satisfaisants en ce qui concerne l'aspect, la résistance mécanique, la compacité et la résistance à la corrosion.

Pour éviter la volatilisation du zinc, il faut adopter le régime le plus faible possible, c'est-à-dire choisir le fil en fonction de l'épaisseur à assembler.

Le soudage à l'arcélectrique sous atmosphère active d'anhydride carbonique

Cette technique (*procédé MAG:* M = métal, A = actif, G = gaz) consiste à remplacer l'argon ou l'hélium, onéreux, par le gaz carbonique ou un mélange CO_2-argon (mélange I : Argon 75 %, CO_2 25 %: mélange II : CO_2 75 %, argon 25 %).

La consommation de CO_2 varie entre 700 et 900 *l/h* ; il doit être sec.

La vitesse d'alimentation du fil ainsi que la densité de courant sont plus grandes qu'en atmosphère d'argon.

Dans l'arc, le CO_2 est d'abord décomposé en C et en O qui, vers 630 °C, se reforment en CO puis en CO_2. La presque totalité du CO_2 fourni est rejetée, d'où l'impérieuse nécessité d'une parfaite ventilation.

La fusion a toujours lieu par grosses gouttes, elle serait tumultueuse si on n'employait pas un métal d'apport spécial et un arc très court.

Le fil d'apport contient du manganèse et du silicium avec parfois des additions d'aluminium de titane ou de zirconium pour combattre les effets oxydants du CO_2 et rendre la fusion plus calme.

Un pistolet spécial avec buse évasée est employé pour le ***soudage par points*** de tôles superposées.

Le procédé *MAG*, maintenant très employé, a des possibilités étendues:

— soudage de tôles fines ($e \angle 1{,}5$ *mm*) et de tubes de petit diamètre;

— soudage en position ;

— soudage à plat intensif ;

— soudage automatique par des machines à cadence rapide ;

L'absence de laitier réduit les temps d'exécution, autorise le soudage de mécanismes délicats et permet d'effectuer des dépôts sur des passes encore très chaudes, procurant ainsi les avantages d'un auto-préchauffage.

Comparaisons entre le procédé MIG et le procédé MAG

Les caractéristiques mécaniques obtenues par soudage *MAG* restent intéressantes tout en étant légèrement inférieures à celles obtenues par le procédé *MIG* [*R* inférieure d'environ 5 %].

Effectués dans les mêmes conditions, les dépôts de métal en procédé *MAG* ont une plus grande pénétration, ils sont plus bombés mais plus irréguliers que les dépôts obtenus en procédé *MIG*. Les procédés *MAG* sont moins exigeants que les procédés *MIG* en ce qui concerne la propreté et l'état des surfaces des tôles. La figure 73 permet de comparer la forme et la pénétration du cordon de soudure dans les deux procédés.

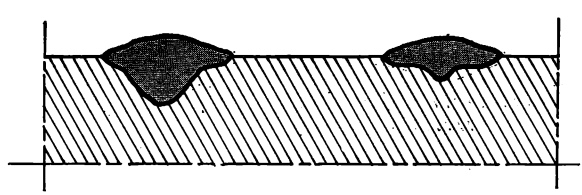


Fig. 73

Soudage sous gaz carbonique (MAG). Soudage sous argon (MIG).

La très forte pénétration donnée par les procédés *MAG* permet, par exemple, le soudage de tôles de 14 *mm* d'épaisseur, placées bord à bord, sans chanfreinage, courant de 450 *A*, fil de 16/10, vitesse d'avance 50 *cm/mn* pour chaque passe (environ deux fois plus qu'avec des électrodes à forte pénétration) (fig. 74).

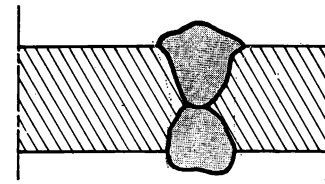


Fig. 74

LES PROCÉDÉS MEFAG, METAG ET MEMAG

Dans ces procédés, l'action protectrice de l'anhydride carbonique est complétée par l'apport d'un **flux solide** qui joue un rôle *ionisant* et *affinant*.

La présence d'un laitier donne un excellent état de surface des cordons de soudure, mais on se retrouve dans la nécessité de procéder au piquage de ce laitier entre chaque passe.

Le procédé MEFAG

Utilise des **électrodes fourrées** (fig. 75) dans lesquelles le flux est logé le plus possible vers la périphérie du fil afin de retrouver les propriétés des électrodes enrobées traditionnelles.

Avec ce fil-électrode, il est possible de souder en corniche et en montant et en descendant jusqu'à des inclinaisons de 30°.

Le procédé METAG

Utilise un **fil toronné** imprégné d'un flux (fig. 76).

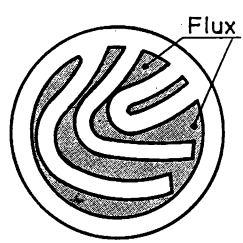


Fig. 75

Cette forme confère au fil une certaine souplesse.

Fig. 76

Comme dans le procédé *MEFAG*, la pénétration est excellente et profonde. Ces procédés rejoignent les possibilités offertes par les procédés de soudage sous flux, mais avec les avantages procurés par un arc visible.

Le procédé MEMAG

Utilise un **flux magnétique** véhiculé par le courant d'anhydride carbonique. L'alimentation se fait en courant continu, polarité inverse.

Deux diamètres de fil sont utilisés: 2,4 *mm* pour le soudage à plat, avec un courant d'au moins 450 *A ;* 1,2 *mm* avec un courant de 125 à 250 *A ;* celui-ci permet le soudage en toutes positions.

Avantages de ces trois procédés sur le procédé MAG classique

— Ils rendent possible, dans de simples conditions, le soudage d'aciers effervescents.

— Ils permettent le soudage d'aciers fortement rouillés, sales ou gras.

— Ils peuvent s'appliquer sur des tôles dont les bords sont mal préparés ou présentant un écartement important et irrégulier.

— Ils admettent d'assez larges variations de tensions.

Enfin, ces procédés peuvent être appliqués par une main-d'œuvre de qualification moyenne.

Contrôle du soudage automatique par télévision

Des machines à souder automatiques, *MIG* et *MAG*, peuvent être munies d'appareils contrôleurs par télévision en circuit fermé lorsque, notamment, il est impossible de poster un opérateur à l'intérieur d'un récipient pour surveiller l'exécution de la soudure.

Une caméra de télévision industrielle est montée sur le coulisseau portant la tête de soudage. Toute la région explorée (bords des assemblages avant soudage, l'arc lui-même et la goutte de soudure se trouvant juste derrière l'arc) apparaît avec une grande netteté de détails sur l'écran de contrôle à l'échelle 2.

De son pupitre et en surveillant l'écran, l'opérateur amorce l'arc et commande tous les mouvements de réglage nécessaires à la bonne exécution de la soudure.

Défauts des soudures à l'arc électrique

Aux défauts signalés à propos du soudage oxyacétylénique, il faut ajouter:

— ***les inclusions de laitier*** provoquées soit par une mauvaise élimination entre deux passes, soit par une inclusion pendant l'exécution de la passe, surtout lorsque l'enrobage est épais ;

— ***le manque de pénétration,*** dû à une électrode trop grosse, à un courant trop faible ou à une mauvaise préparation. On peut l'éviter en faisant une reprise à l'envers ;

— ***le collage,*** conséquence d'un arc trop long, d'une intensité trop faible ou d'une instabilité d'arc. Il est plus rare, toutefois, qu'en soudage oxyacétylénique ;

— ***les caniveaux,*** produits par une mauvaise manipulation de l'électrode (balancement trop fort) ou par l'emploi d'un courant trop fort ;

— ***les soufflures,*** qui ont pour causes: un métal de base chargé en soufre ; un métal humide, rouillé ou pollué ; l'emploi d'une électrode humide ; un arc trop long ;

— ***les criques et fissures,*** évidemment favorisées par manque de pénétration ou par le dénivellement des bords, sont aussi provoquées (surtout pour les aciers durs), par un refroidissement trop rapide ou une température extérieure très basse (vers 0 °C). Criques et fissures sont évitées par un *préchauffage* (max.: 350 °C) et un *postchauffage*, les soudures étant réalisées sans interruption en relayant s'il le faut les soudeurs.

Les criques et fissures se manifestent également lors du retrait de pièces très bridées.

Rôle du préchauffage

Plus l'épaisseur d'un métal (ou alliage) est forte, plus sa susceptibilité au criquage augmente, car la chaleur apportée par l'opération de soudage se dissipe plus rapidement dans la masse du métal et la vitesse de refroidissement est plus grande.

Le préchauffage des aciers qui prennent facilement la trempe ou celui de très fortes épaisseurs réduit les vitesses de refroidissement et diminue l'amplitude des contraintes résiduelles de contraction.

Du fait de la diminution de la vitesse de refroidissement, la zone affectée par la chaleur reste plus longtemps dans le domaine 550 - 650 °C et la structure micrographique de l'acier après soudage se modifie: *l'austénite* se décompose en *ferrite* ou *perlite* mais pas en *martensite* (produit de trempe), aussi un préchauffage vers 100 - 200 °C est suffisant pour empêcher la formation de criques d'un acier demi-dur contenant jusqu'à 0,30 % *C.*

IL FAUT TENIR COMPTE DES EFFETS DU RETRAIT

dans la préparation et l'exécution des soudures, tout comme en soudage au chalumeau (1) quoique ces manifestations soient moins importantes, car le chauffage de la pièce est plus rapide et la soudure moins large.

Le recuit de détensionnement est toujours effectué sur les pièces soumises à des efforts importants.

---

(1) Voir soudage oxyacétylénique.

Soudage électrique des goujons au pistolet

PRINCIPE DU PROCÉDÉ

On fait éclater un arc électrique entre la pièce et l'extrémité du goujon poussé par un pistolet qui amène le courant de soudage.

L'OPÉRATION SE DÉCOMPOSE EN TROIS PHASES (fig. 77):

1° ***écartement du goujon de la pièce,*** afin de permettre l'amorçage d'un arc électrique ;

2° ***passage du courant*** (intensité et temps de passage en rapport avec les dimensions du goujon) ;

3° ***poussage du goujon*** dans le métal en fusion.

Le positionnement s'effectue soit à la main, soit avec un gabarit.

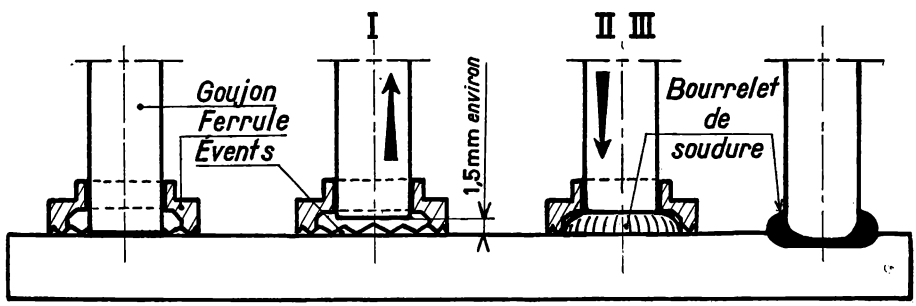


Fig. 77

Positionnement. Soudage. Coupe du bourrelet.

L'OPÉRATION EST RÉALISÉE PAR UN PISTOLET relié à un *poste de soudage,*

de préférence à courant continu, suffisamment puissant (500 *A* pour goujons de 10 à 12 *mm* de diamètre, 2 000 *A* pour goujons de 22 *mm* de diamètre) et ayant une tension à vide supérieure à 50 *V.*

Une boîte de commande, actionnée par la gâchette du pistolet, règle de façon précise le temps de fermeture du circuit de soudage.

LES GOUJONS

Ils sont de formes très variées (droits, coudés, en crochet, carrés, plats, épaulés, etc.) (fig. 78) ; leur diamètre maximal, dans les conditions actuelles de la technique, est de 32 *mm*.

L'extrémité du goujon contient dans un évidement une petite quantité de poudre destinée à stabiliser l'arc et à désoxyder le métal liquide constituant la soudure.

Les goujons d'un diamètre inférieur à 7 *mm* ont leur extrémité simplement pointue.

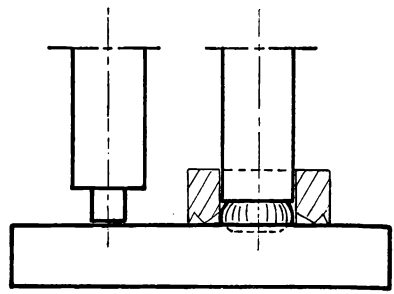


Fig. 78

Goujon épaulé. Après soudage, il n'y a aucun bourrelet.

FERRULES EN CÉRAMIQUE

La pose de chaque goujon nécessite l'emploi d'une bague en céramique, nommée *ferrule* (1), dans laquelle il coulisse. La ferrule (fig. 77) remplit plusieurs rôles :

1° concentrer la chaleur de l'arc ;

2° servir de creuset au métal en fusion, afin de former un bourrelet régulier à la base du goujon ;

3° protéger le métal en fusion contre l'air ambiant ;

4° canaliser les gaz qui se dégagent du métal en fusion vers la base du goujon, et les évacuer par les évents.

De plus, la ferrule masque presque entièrement l'arc au soudeur qui peut ainsi opérer les yeux nus.

AVANTAGES DU PROCÉDÉ

— La pose est très rapide (100 à 300 goujons soudés à l'heure).

— Les caractéristiques mécaniques d'un goujon soudé au pistolet sont supérieures à celles d'un goujon vissé, et même à celles d'un goujon soudé électriquement en congé car, à l'effet de soudage, s'ajoute un effet de forgeage (poussée du goujon) qui améliore la résistance à la fatigue et aux chocs.

(1) *Ferrule* avec 2 r : mot anglais signifiant *collerette*.

— Il permet de concevoir des fabrications plus simples et plus légères, par exemple: suppression de bossages de surépaisseurs nécessaires au taraudage. En effet, le soudage de goujons dont le rapport: diamètre du goujon/épaisseur de la tôle, est inférieur ou égal à 3 n'offre aucune difficulté; ce rapport peut atteindre 4 en prenant quelques précautions.

On peut souder des goujons de faible diamètre sur des tôles très épaisses. On peut également souder des goujons en acier inoxydable.

Les pistolets sont très maniables (le pistolet « Nelson » pèse 2,5 *kg*); ils sont utilisés à l'atelier ou sur le chantier en toutes positions.

Des machines semi-automatiques ou automatiques sont employées pour le travail en série.

Grâce à l'isolement procuré par la ferrule on peut, en faisant usage de gabarits simples, obtenir une bonne précision de pose.

Une technique plus récente, valable pour de petits goujons seulement (∅ maximal: 6,3 *mm* en acier, acier inoxydable, aluminium ou laiton) permet de souder ceux-ci sans flux ni ferrule. Le goujon comporte simplement un téton décolleté de 0,4 à 0,8 *mm* de diamètre, d'une longueur de 0,4 à 1,2 *mm* qui présente une résistance électrique quadruple de celle du goujon. Le téton règle l'épaisseur d'une mince lame d'air entre le goujon et la pièce; lors du passage du courant de décharge, il se volatilise, ionisant l'atmosphère, permettant une fusion à pleine section du goujon et de la pièce avec une pénétration de l'ordre de 0,12 à 0,25 *mm*. C'est à ce moment que la pression de soudage est exercée.

L'amenée de courant ayant toujours lieu côté soudage, on peut souder sans altération sur tôle vernie, émaillée ou plastifiée à l'envers.

Teintes conventionnelles des ogives des bouteilles à gaz comprimés et des tuyauteries transportant ces gaz

Pour les gaz employés en soudage, la norme française *NF A* 81-201 (avril 1966) fixe les teintes suivantes:

Acétylène dissous:	*marron clair*	***Hélium:***	*brun*
Anhydride carbonique:	*gris*	***Hydrogène:***	*rouge*
Argon:	*jaune*	***Oxygène:***	*blanc*
Azote:	*noir*		

Ajoutons que les canalisations d'***air comprimé*** doivent être peintes en *noir avec des bandes blanches*, ce qui correspond à la disposition générale de la norme ; le noir identifiant l'azote, gaz qui prédomine dans le mélange ; les bandes blanches identifiant l'oxygène, second gaz du mélange.

CHAPITRE IX

LE SOUDAGE « PLASMA »

Le terme *« plasma »*, dans son sens général définit une atmosphère gazeuse ionisée et chaude, constituée d'ions positifs et d'électrons dans un ensemble globalement neutre.

Le terme *« plasma »* est actuellement employé pour décrire l'état d'énergie élevée provoqué par l'étranglement mécanique d'un arc électrique au moyen d'une tuyère d'étranglement énergiquement refroidie.

Principe de formation du plasma d'arc

Le plasma d'arc est obtenu en portant un gaz à une température suffisamment élevée pour provoquer une dissociation des molécules du gaz en atomes, puis en ions et électrons.

Ces deux processus sont appelés respectivement *dissociation thermique* et *ionisation thermique*. Ils aboutissent à la formation du ***plasma thermique***.

Le plasma est donc formé d'un ensemble (électriquement neutre) d'ions et d'électrons en équilibre avec des molécules ou des atomes non ionisés.

APPLICATIONS DU PLASMA D'ARC

La possibilité d'atteindre des températures très élevées (30 000 °K) à l'aide d'un plasma fait que celui-ci est employé couramment pour le *coupage de tous les métaux* (1) et le *rechargement*. Le *soudage plasma* fait son entrée dans le domaine industriel.

---

(1) Voir tome I, chapitre VI.

FORMATION DU JET PLASMA DANS LE CHALUMEAU

Une cathode émet des électrons qui sont attirés par une anode. ***Le gaz plasmagène*** est ionisé entre ces électrodes. Dans le chalumeau à jet de plasma, on emploie soit un ***gaz monoatomique*** (*argon*), soit un ***gaz biatomique*** (*azote*) soit encore un mélange *argon-hydrogène.*

ON DISTINGUE DEUX TYPES D'ARC :

1) **L'arc non transféré ou soufflé** produit entre une électrode réfractaire (tungstène) généralement reliée au pôle négatif d'un générateur à caractéristiques tombantes et la tuyère formant anode. *Le circuit électrique est ainsi fermé à l'intérieur du chalumeau* (fig. 1). Le jet de plasma ne conduit donc pas le courant à l'extérieur de la tuyère ; cependant, dans certaines conditions de fonctionnement, l'arc sort légèrement du conduit pour revenir ensuite sur l'extrémité de la tuyère (fig. 2).
2) **L'arc transféré** établi entre l'électrode réfractaire (pôle —) et les pièces à assembler ou le matériau à couper (pôle +). *Le jet de plasma est entièrement parcouru par le courant électrique* (fig. 3).

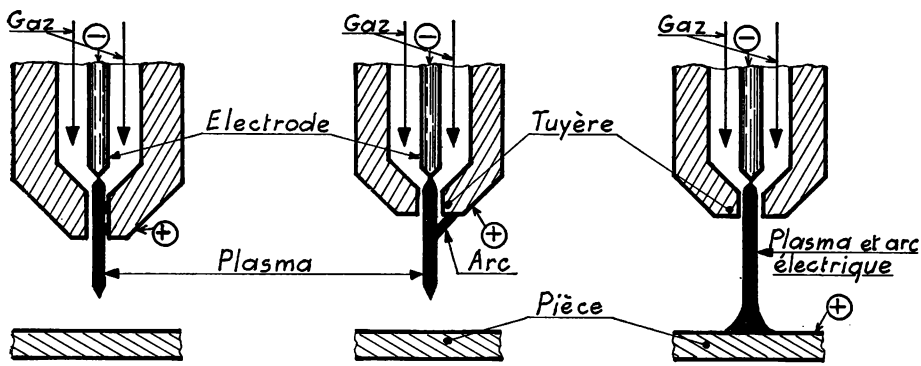


Fig. 1 — Arc non transféré. interne

Fig. 2 — externe

Fig. 3 — Arc transféré.

L'arc se manifeste, par conséquent, entre l'électrode, à l'intérieur du chalumeau, et la pièce ce qui augmente la chaleur transmise au joint. De plus, l'énergie cinétique des électrons qui bombardent le métal sur une faible section contribue à la fusion rapide et localisée des parties à assembler.

L'arc transféré est employé exclusivement pour le coupage et le rechargement et, d'une manière générale pour le soudage, sauf parfois en soudage « *microplasma* » (soudage de très fines épaisseurs) ou, par exemple, pour l'assemblage de pièces non conductrices de l'électricité.

L'arc plasma est dit « étranglé » alors que l'arc électrique classique est dit « libre ».

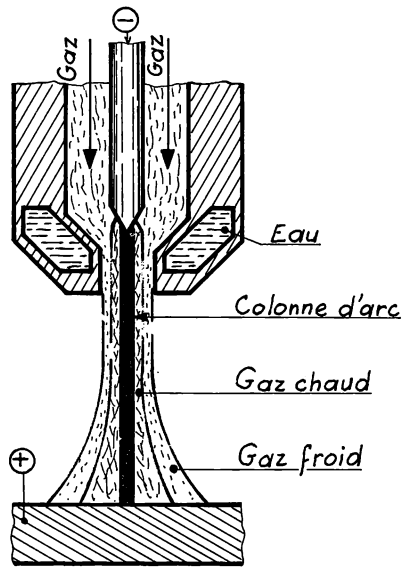


Fig. 4
Différentes zones de l'arc transféré.

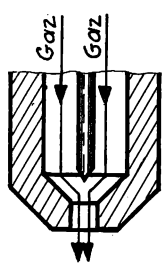


Fig. 5
Écoulement du jet de gaz dans la tuyère.
Parallèlement à l'axe.

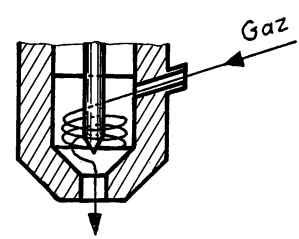


Fig. 6
Tangentiellement à l'axe.

PROPRIÉTÉS DE L'ARC ÉTRANGLÉ

L'étranglement d'un arc électrique en atmosphère gazeuse à travers un orifice de faible diamètre conduit à un effet de striction et à une concentration de l'énergie dans la partie centrale de l'orifice de la tuyère.

La concentration de l'énergie est attribuée aux phénomènes de pincements électro-magnétiques et thermiques.

Le champ magnétique produit par le courant électrique étreint la colonne d'arc ; il en résulte une forte densité de courant et un chauffage, par effet Joule, intense qui provoquent une température très élevée au centre de la « *veine plasma* ».

Par contre, le gradient de température est très grand à la périphérie de la veine plasma et la conductibilité thermique faible (fig. 4). La couche extrême de la veine constitue un écran thermique et électrique qui assure le maintien de températures élevées dans le noyau d'arc dont l'aspect est *cylindrique* et directionnel.

La température maximale dans l'arc croît avec le produit UI (U = tension, I = *intensité*). Ainsi, l'arc étranglé, caractérisé par une tension élevée (qui peut être double de celle de l'arc TIG) permet l'obtention de hautes températures axiales avec un courant électrique modéré.

En pratique, la stabilité de l'arc peut être assurée par l'arrivée du gaz soit parallèlement (fig. 5) soit tangentiellement (fig. 6) à l'axe de l'électrode.

Mise en œuvre du procédé plasma

I — ÉPAISSEURS SUPÉRIEURES A 2,5 *mm* ENVIRON

La technique du soudage plasma diffère essentiellement de celle du coupage par la valeur du débit de gaz qui est beaucoup plus faible dans le cas du soudage.

La fusion des bords à assembler s'effectue en formant dans le joint un trou qui subsiste pendant toute l'opération. Au fur et à mesure de la progression, le bain de fusion formé à l'arrière du trou et maintenu par les tensions superficielles se solidifie pour former le cordon de soudure.

La mise en œuvre est semblable à celle du procédé *TIG*. Il est possible d'utiliser un apport de métal. Cet apport se fait sans précautions particulières et n'obstrue pas le trou formé par l'arc.

En fin de soudure, notamment dans le cas de soudures circulaires, pour supprimer le trou et le cratère il faut diminuer progressivement l'intensité du courant et le débit de gaz en fin d'opération.

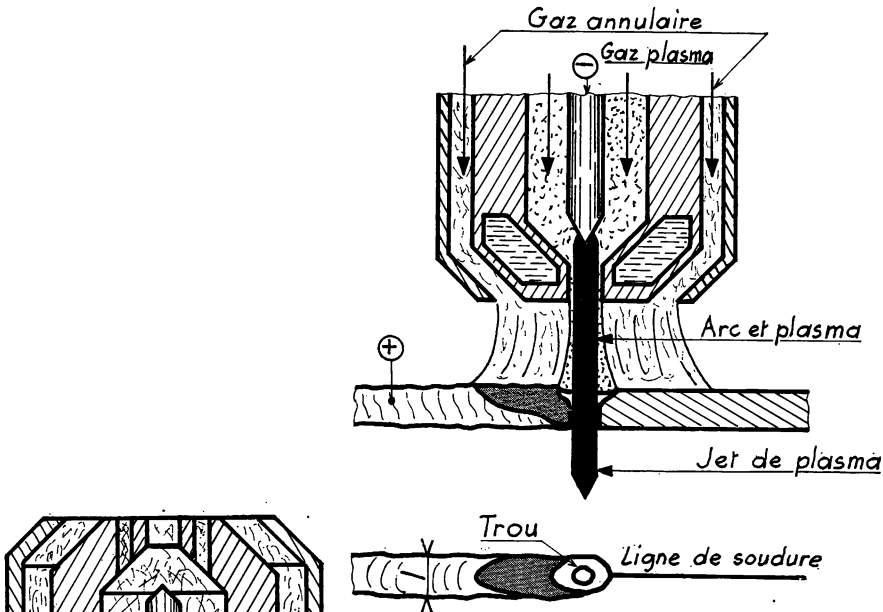


Fig. 7
Tuyère à un seul orifice.

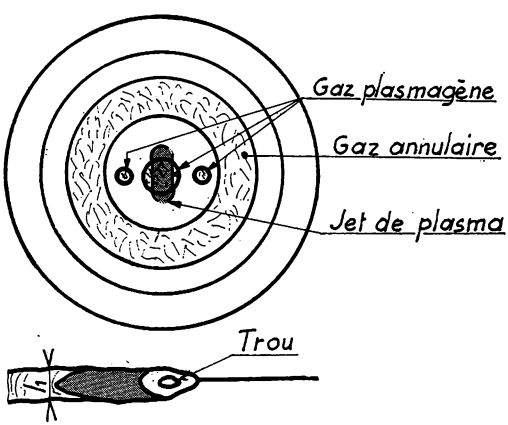


Fig. 8
Tuyère à plusieurs orifices.

Le mode d'alimentation généralement adopté est le courant continu, polarité directe (pôle — à l'électrode). L'électrode est en tungstène thorié.

On peut aussi utiliser la polarité inverse notamment pour le soudage des alliages légers et du zirconium. L'électrode est alors constituée par une pastille en cuivre (meilleure évacuation des calories) énergiquement refroidie.

L'installation du procédé de soudage plasma se réalise très facilement sur tout banc de soudage automatique.

Débits gazeux : les faibles débits de gaz plasmagène (1 à 8 *l/mn*) adoptés en soudage sont insuffisants pour assurer une bonne protection du métal fondu. A cet effet, la torche de soudage comporte une protection annulaire supplémentaire (fig. 7) dont le débit moyen est de 15 à 20 *l/mn.*

NOTA. — Il existe des tuyères dans lesquelles le gaz s'échappe également par deux orifices latéraux supplémentaires situés de part et d'autre de l'orifice principal (fig. 8). Ces injections de gaz froid de chaque côté de la soudure ont pour effet d'abaisser la température de la couche de gaz située de chaque côté du joint et d'aplatir le jet de plasma en l'ovalisant. Il en résulte que la zone fondue est plus étroite ($l1 < l$) et la vitesse de soudage améliorée.

Protection de l'envers de la soudure : les soudures bord à bord sont toujours exécutées sans soutien à l'envers, seule une protection gazeuse de l'envers est nécessaire pour les matériaux susceptibles d'être contaminés par l'atmosphère.

Distance torche-joint : la distance normale se situe entre 5 et 8 *mm* mais elle peut être plus importante (25 à 30 *mm* pour une passe en fond de chanfrein) sans pour autant modifier l'aspect et la qualité du cordon. Cette qualité est due à la haute concentration de l'énergie et à la forme cylindrique du plasma ainsi qu'à sa rigidité.

Tension : ce n'est pas un paramètre aussi important que pour le procédé *TIG.* Elle varie entre 25 et 35 *V* selon l'intensité adoptée, la distance torche-joint et la nature du gaz.

Intensité : elle est fonction de l'épaisseur à souder mais varie peu avec celle-ci.

EXEMPLE : pour le soudage de l'acier inoxydable, si $e = 3$ *mm* $I = 150$ *A* et si $e = 8$ *mm* $I = 300$ *A.*

Influence de la composition de l'atmosphère plasmagène et de l'atmosphère de protection.

La nature du gaz plasmagène a une grande influence sur la forme et la largeur du cordon de soudure et sur la vitesse de soudage. La nature des gaz assurant la protection de la zone fondue exerce aussi une influence très marquée sur ces paramètres.

MATERIEL

Il comprend :

— **un générateur de courant continu** à caractéristique tombante. Une tension à vide de 75 *V* suffit pour l'amorçage de l'arc en atmosphère d'argon. Avec certains gaz ou mélanges une tension à vide de plus de 100 *V* est nécessaire.

— **une torche** ou chalumeau munie d'un double circuit d'eau de refroidissement (électrode et tuyère) et de deux circuits de gaz indépendants (plasma et gaz de protection).

— **un coffret de commande** comprenant les dispositifs d'amorçage d'arc, les organes de commande et les électrovannes de gaz et d'eau.

PRÉPARATION DES BORDS A SOUDER

Il est possible de réaliser des assemblages à franc bord (bords jointifs) jusqu'à une épaisseur de 6 *mm* en utilisant une tuyère multiorifices qui conduit à une concentration plus poussée de l'énergie.

Au delà de 6 *mm*, les bords sont chanfreinés. L'angle d'ouverture du chanfrein est de 60 à 75 ° avec un talon de 4 à 5 *mm* (1). Il est nécessaire de préchauffer le joint (150 °C pour $e = 10$ *mm*).

COMPARAISON ENTRE LE PROCÉDÉ TIG ET LE PROCÉDÉ PLASMA

Les figures 9 et 10 font comprendre l'avantage du procédé plasma sur le procédé TIG. Le chanfrein étant plus faible, le procédé plasma ne nécessite que deux passes de soudage, alors que le procédé *TIG* en exige six.

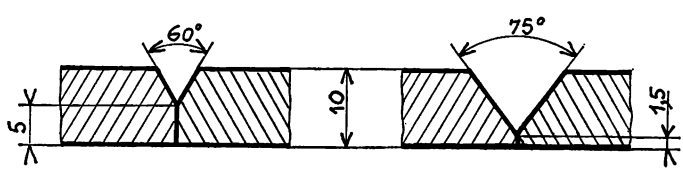


Fig. 9 Fig. 10

Préparation des bords.

Plasma: 2 passes. TIG: 6 passes.

La quantité de métal déposé dans le chanfrein en procédé *TIG* est 4,5 fois celle qui est nécessaire avec le procédé plasma.

---

(1) Dans l'avenir on espère pouvoir souder bout à bout sans chanfrein ni métal d'apport, en une passe, des épaisseurs supérieures à 12 *mm*.

Le temps propre de soudage est 5 fois supérieur en procédé *TIG* qu'en procédé plasma.

La qualité de la soudure est identique pour les deux procédés : bonne compacité, structures métallographiques semblables aussi bien dans la zone fondue que dans la zone de liaison.

APPLICATIONS DU PROCÉDÉ

Procédé en période de développement, il peut s'appliquer sur tous les métaux soudables par le procédé *TIG*.

Sa mise en œuvre est aisée. Il permet de souder des tôles plus épaisses que par le procédé *TIG* dans des conditions économiques en raison des vitesses de soudage élevées et des préparations de joints simplifiées qui entraînent de faibles consommations de métal d'apport. Les soudures sont toujours exécutées sans support à l'envers tout en présentant des pénétrations régulières.

Il offre l'avantage sur l'arc *TIG* d'être beaucoup moins sensible aux variations de longueur d'arc et aux irrégularités dans la préparation des bords.

II — LE PROCÉDÉ MICROPLASMA

Le domaine du soudage microplasma est celui des basses intensités : 0,2 à 10 A environ.

Les épaisseurs inférieures à 0,5 *mm* sont difficiles à assembler par le procédé *TIG* étant donné la faible hauteur d'arc qui doit être maintenue et l'instabilité de cet arc aux faibles intensités.

Avec le procédé microplasma ces faibles épaisseurs peuvent être soudées avec des hauteurs d'arc de 6 *mm* qui conduisent à une bonne visibilité de la zone de soudage.

La variation des longueurs d'arc n'affecte ni l'intensité, ni la qualité de l'assemblage. Ceci est dû à *l'étranglement de l'arc électrique*.

La gamme d'épaisseurs propre au microplasma se situe entre 0,01 et 0,8 *mm* environ pour l'acier inoxydable, le nickel et le titane. Cette gamme varie avec les autres métaux.

Conditions de fonctionnement

On utilise le courant continu, polarité directe pour l'alimentation de l'arc qui, généralement est *transféré* mais peut être aussi *soufflé*.

Arc transféré : il n'est jamais utilisé seul mais conjointement avec un *arc pilote* (arc non transféré) qui a pour but *d'ioniser le gaz* dans des proportions

compatibles avec une parfaite stabilité dans toute la gamme d'intensités du procédé. L'arc pilote est amorcé par haute fréquence.

Arc non transféré : il est utilisé dans des cas particuliers d'assemblage d'éléments métalliques et aussi pour le soudage de pièces non conductrices de l'électricité.

La quantité de chaleur transmise aux éléments à souder est très inférieure à celle de l'arc transféré.

Débits gazeux : le débit du gaz plasmagène (généralement l'argon) est compris entre 0,2 et 0,8 *l/mn*.

Le débit du gaz de protection est compris entre 3 et 10 *l/mn*. Ainsi qu'en plasma classique on utilise les mélanges *argon — hydrogène* pour les soudages sur acier inoxydable, le nickel et ses alliages, ainsi que les mélanges *argon — hélium* (70 % d'hélium) pour le soudage du titane, du cuivre et du laiton.

Technique opératoire

Les soudures bord à bord sont réalisées sans formation de trou dans le joint.

La préparation des assemblages se fait soit bout à bout soit sur bords relevés.

En soudage bord à bord l'écartement ne doit pas excéder le dixième de l'épaisseur du joint.

Pour les épaisseurs inférieures à 0,1 *mm* la préparation à bords relevés évite l'emploi d'apport de métal. On peut ainsi souder des éléments ayant 0,01 *mm* d'épaisseur.

CHAPITRE X

LE SOUDAGE PAR BOMBARDEMENT ÉLECTRONIQUE

GÉNÉRALITÉS

Un filament porté à l'incandescence dans le vide émet des électrons. Si ces électrons sont accélérés par une tension positive, ils acquièrent une énergie cinétique ; ils libèrent cette énergie sous forme de chaleur lors de l'impact sur l'électrode positive.

Un électron qui se déplace dans le vide obéit aux champs électriques et aux champs magnétiques auxquels il est soumis.

PRINCIPE DU SOUDAGE PAR BOMBARDEMENT ÉLECTRONIQUE

Un faisceau d'électrons accéléré et concentré frappant un métal y libère la quasi totalité de son énergie sous forme de chaleur. Très rapidement le métal est porté à son point de fusion.

Si un faisceau d'électrons est dirigé sur le plan de jonction de deux pièces à assembler, les bords de ces pièces fondent et, après refroidissement, forment une soudure.

En déplaçant les pièces sous le faisceau, on réalise ainsi un cordon de soudure continu.

La pénétration des électrons dans un métal n'étant que de l'ordre de 1/100 *mm*, on explique la fusion immédiate et profonde (actuellement : 150 *mm* sur acier inoxydable) des pièces exposées à un faisceau d'électrons de la façon suivante :

Les premiers électrons qui frappent le métal *le fondent et volatilisent en partie*, ils ionisent les atomes, créent un plasma et ouvrent le chemin aux électrons suivants qui, poursuivant leur action en profondeur, forment un trou étroit et pro-

fond. Du fait de la conductivité thermique élevée du métal, la diffusion, en arrière de la fusion, de la chaleur apportée par les électrons, détermine une solidification immédiate du métal fondu. Le trou, est ainsi rebouché en arrière au fur et à mesure de sa formation. La largeur des soudures varie de 0,5 à 5 *mm* selon les épaisseurs.

Le soudage s'effectue dans une enceinte hermétique sous un vide de 10^{-5} *torr*. Ce vide protège la cathode émettrice d'électrons, évite les effluves, empêche les trajectoires des électrons de dévier (1) et protège les métaux à souder, même les plus sensibles, de toute pollution atmosphérique.

L'ensemble, constitué par la cathode en tantale ou en tungstène ; les dispositifs de concentration (*focalisation*) des électrons en un faisceau de 0,2 à 0,8 *mm* de diamètre ; les électrodes de contrôle ou d'accélération, forme un ***canon à électrons.***

DONNÉES DU SOUDAGE PAR BOMBARDEMENT ÉLECTRONIQUE

Les paramètres à prendre en considération sont :

— la nature du métal à souder ;

— le volume et la forme des pièces à souder qui déterminent les dimensions de la chambre à vide ;

— la qualité du vide ;

— la puissance (tension et intensité) à mettre en œuvre, ainsi que son temps d'application.

Nature du métal à souder :

— Il faut tenir compte de sa conductibilité thermique qui tend à évacuer la chaleur dégagée vers la masse de la pièce et ses supports.

— La teneur du métal en produits gazeux, dissous, occlus ou combinés, en impuretés volatiles et la volatilité du métal lui-même conditionnent la vitesse d'absorption des pompes.

Qualité du vide. Pompage : L'air contenu dans la chambre à vide est évacué par un système de pompage qui comprend :

a) Une pompe mécanique dite « *pompe primaire* » qui abaisse la pression aux environs de 10^{-2} *torr* (2).

b) Une pompe moléculaire dite « *pompe secondaire* » capable d'abaisser la pression jusqu'à 10^{-5} *torr*, ou pompe à diffusion.

---

(1) Distance maximale entre canon et pièce : 600 *mm*.

(2) Un torr est égal à la pression exercée par une colonne de mercure de 1 *mm* de hauteur et 1 cm^2 de surface.

REMARQUE. — Le groupe de pompage doit être capable de maintenir le vide obtenu, malgré les dégagements gazeux provoqués par la fusion et la volatilisation du métal.

c) Un appareillage de mesure de vide.

Tension d'accélération du faisceau d'électrons.

Pour communiquer une énergie suffisante aux électrons, cette tension est nécessairement élevée. Elle est généralement comprise entre 20 et 30 kilovolts et peut atteindre 60 *kV*.

REMARQUE. — L'impact des électrons à grande vitesse produit des radiations ionisantes (rayons X) très dangereuses pour l'opérateur. Jusqu'à 30 *kV* il ne se produit que des rayons « *mous* » dont il est facile de se protéger. La paroi en acier inoxydable ($e = 15$ à 25 *mm*) de la chambre à vide suffit pour arrêter les radiations. Par précaution, on ajoute une couche de plomb de quelques millimètres. De 30 à 60 *kV* le rayonnement, plus pénétrant, nécessite une couche épaisse de plomb. Au delà de 60 *kV*, il y a production de rayonnements « *durs* » qui obligent à des protections à peu près irréalisables pour une machine industrielle.

Pour élever la puissance, on préfère donc augmenter l'intensité afin de rester dans un domaine de tension raisonnable.

Intensité du courant. L'intensité maximale est fixée par la surface effective de la source d'électrons (*cathode*) et par sa température. Celle-ci est limitée d'une part par le courant de saturation et, d'autre part, par la durée de vie de la cathode. Pratiquement, les dimensions de la cathode permettent d'obtenir un courant de saturation de l'ordre de 0,4 ampères pour une durée de vie de plusieurs centaines d'heures.

FOCALISATION. CANON A ÉLECTRONS

Il existe deux types de canons à électrons.

a) **Le canon Zeiss** qui concentre les électrons sur un impact très localisé. Il fonctionne sous tension élevée. Très peu employé actuellement, il le sera peut-être pour le micro-soudage.

b) **Le canon Pierce** dans lequel la tension de fonctionnement est modérée. Il utilise un champ électrique créé entre les électrodes négative (cathode) et positive (anode) aux formes conjuguées pour projeter et diriger le faisceau d'électrons qu'une bobine concentre sur la surface de la pièce à souder.

La cathode est, généralement, constituée par une coupelle en tantale, portée à l'incandescence par un courant continu d'environ 40 ampères sous 4 à 5 volts.

L'anode est constituée par une coupelle métallique à trou central par lequel passent les faisceaux d'électrons.

Une concentration électrostatique est obtenue en donnant aux deux électrodes une forme telle que les courbes équipotentielles fassent converger le faisceau

d'électrons vers un foyer F (fig. 1). Au delà de ce foyer, les électrons divergent à nouveau. En réalité, les électrons commencent à diverger avant d'atteindre le foyer car ils ont une charge négative et tendent à se repousser mutuellement. Ce phénomène est appelé : *effet de charge d'espace.*

Toute variation de tension provoque un déplacement du point focal et oblige à changer la distance entre le canon et la pièce à souder.

Pour remédier à cet inconvénient, un *champ magnétique* est ensuite appliqué par une bobine qui fait reconverger le faisceau d'électrons vers un deuxième foyer F' (fig. 2).

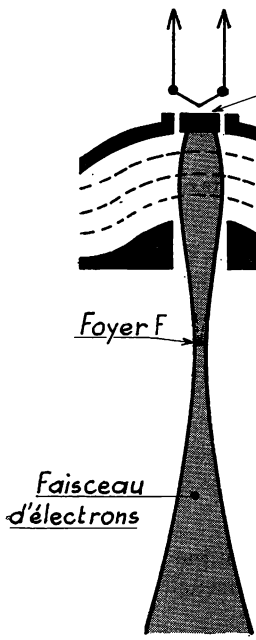


Fig. 1
Schéma théorique d'un canon à électrons montrant le champ électrostatique, la convergence au foyer F et la divergence due à la charge d'espace.

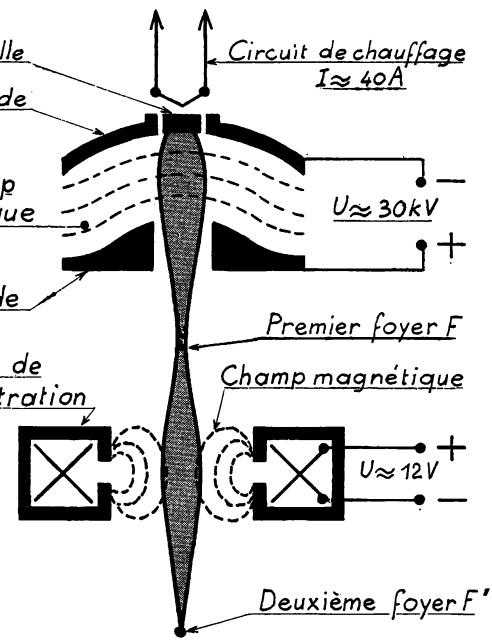


Fig. 2
Schéma théorique d'un canon à électrons muni d'une post-concentration par champ magnétique.

L'intensité du champ, produit par un enroulement parcouru par un courant continu, est réglée en faisant varier ce courant. Il en résulte que ce deuxième foyer peut être, dans une certaine limite, déplacée afin d'obtenir constamment la concentration optimale d'électrons au niveau de la pièce à souder.

PUISSANCE TOTALE ET PUISSANCE SPÉCIFIQUE

La puissance totale, exprimée en *kilowatts* est le produit de la tension par le courant maximal. *La puissance spécifique*, exprimée en *kilowatt par millimètre*

carré est la puissance totale divisée par la surface couverte par le faisceau d'électrons.

La puissance spécifique du canon Sciaky est de 23 kilowatts par millimètre carré pour une puissance totale de 7,5 kilowatts.

Cet exemple montre que la surface de la *tache d'impact* (de forme circulaire), est très faible, 7,5 : 23 = 0,326 mm^2, soit un diamètre de 0,64 *mm*.

REMARQUE. — Si la surface du « *point d'impact*» peut être très réduite, il est également possible de l'augmenter en faisant varier le courant dans la bobine de concentration. Le faisceau d'électrons élargi peut être utilisé pour le brasage, le recuit local ou le dépôt de couches métalliques par évaporation.

NOTA. — Le travail de l'opérateur est facilité par l'utilisation d'un épiscope de visée qui agrandit l'emplacement de la tache d'impact.

AVANTAGES ET POSSIBILITÉS D'APPLICATION DU PROCÉDÉ

— ***Absence d'oxydation*** puisque le soudage s'effectue dans le vide. Ceci permet le soudage de métaux particulièrement sensibles à l'oxygène et à d'autres gaz tels que : tantale, titane, zirconium, niobium, etc.

— ***Épuration et passivation du métal soudé.*** Pendant l'opération de soudage il se produit une réduction des parcelles d'oxyde que peut contenir le métal. La purification de la zone soudée est telle que l'oxydation n'y a plus de prise.

— ***Soudage de tous métaux et alliages,*** y compris les métaux sensibles tant à l'oxygène qu'à d'autres gaz (azote, hydrogène).

EXEMPLES ; cuivre, zirconium, titane, tantale, aluminium, nobium, etc.

— ***Soudage de métaux réfractaires*** comme le molybdène et le tungstène. La grande vitesse à laquelle s'effectue le soudage réduit le temps de chauffe et permet de réaliser des soudures robustes présentant une grosseur de grains acceptable.

— ***Soudage dans toutes les positions*** en raison du faible volume du bain de fusion et de la grande vitesse opératoire.

— ***Grande profondeur de pénétration*** qui permet de souder des pièces très épaisses sans aucune déformation, en formant un cordon dont le rapport profondeur — largeur est couramment de l'ordre de 10 à 15 (fig. 3 et 4) et peut atteindre 40.

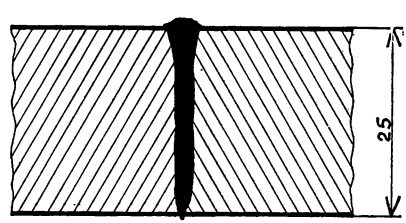
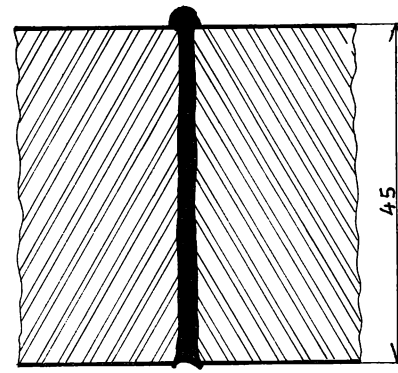


Fig. 3
Coupe d'une soudure sur acier inoxydable.

Fig. 4
Coupe d'une soudure sur aluminium. La soudure est plus uniformément étroite sur l'aluminium que sur l'acier inoxydable, l'aluminium étant meilleur conducteur de la chaleur que l'acier inoxydable.



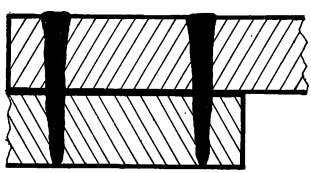


Fig. 5
Pénétration totale.

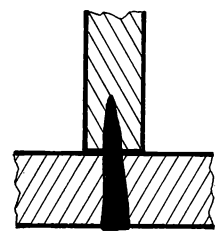


Fig. 6
Joints en T. Pénétrations limitées.

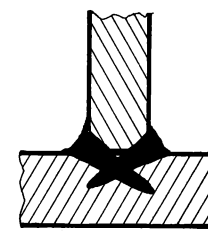


Fig. 7

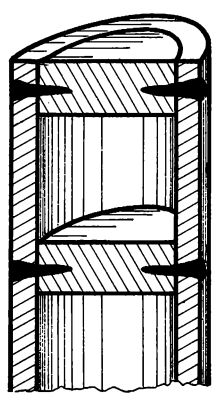


Fig. 8
Soudage par pénétration.

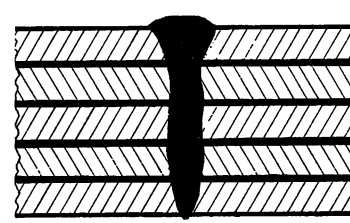


Fig. 9
Soudage de 5 épaisseurs de 10 mm en acier inoxydable.

Il est possible également, de souder plusieurs épaisseurs superposées (fig. 9).

— ***Soudage par pénétration.*** Lorsque le joint à réaliser n'est pas accessible de l'extérieur de la pièce il est dit « *aveugle* ». Pour atteindre ce joint le métal doit être fondu à travers une paroi, c'est ce qu'on appelle une *soudure par pénétrations* (fig. 5, 6, 8, 9).

— ***Soudage par surpénétration.*** Il consiste à exécuter des soudures après avoir traversé une paroi de métal. Ainsi (fig. 10) la paroi du tube *A* est percée par le faisceau d'électrons qui continue son trajet dans le vide à travers le tube et vient frapper l'autre paroi sur la génératrice tangente au tube *B*. Il y a soudage des deux tubes et le passage à travers la première paroi se referme de lui-même derrière le faisceau.

— ***Limitation de la profondeur de soudage.*** En agissant à la fois sur la puissance et la vitesse de soudage on peut régler la profondeur de la fusion afin de réaliser des assemblages à *pénétration limitée* (fig. 11, 6, 7, 8).

— ***Soudage de métaux différents.*** En prenant certaines précautions, des assemblages de cuivre et titane ou d'aluminium et d'acier inoxydable, par exemple, sont réalisables.

La soudure cuivre-titane est de bonne qualité si la quantité de cuivre est plus importante que celle de titane dans le joint. Pour atteindre ce but, il faut compenser les écarts des caractéristiques importantes : chaleur spécifique, conductibilité thermique et point de fusion en dirigeant le faisceau d'électrons sous un angle déterminé (15° par exemple) (fig. 12)

Pour souder l'aluminium avec l'acier inoxydable le faisceau d'électrons est dirigé obliquement sur l'acier de façon que celui-ci, porté à haute température, soit capable de fondre l'aluminium. Le joint est du type brasé et de faible résistance.

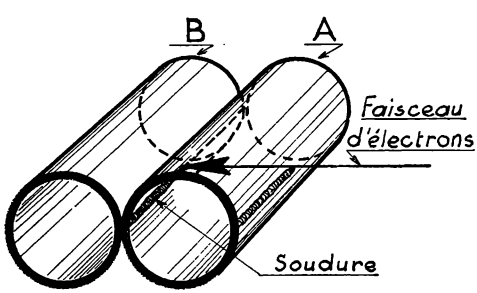


Fig. 10
Soudage par surpénétration.

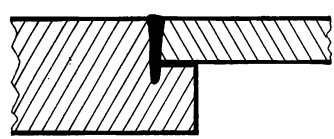


Fig. 11
Soudage à pénétration limitée.

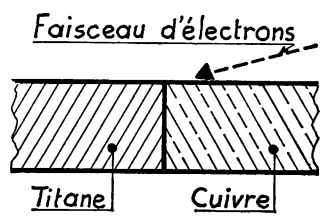


Fig. 12

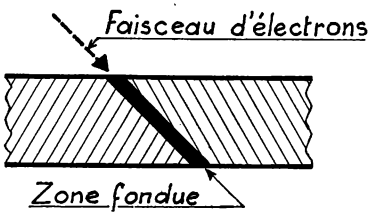


Fig. 13

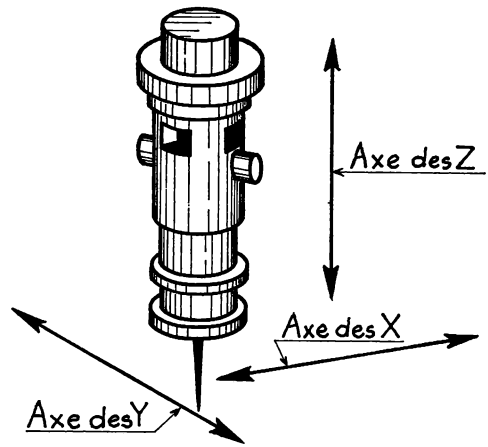


Fig. 14

Le canon se déplace suivant l'axe des X pour effectuer la soudure. Il se déplace suivant l'axe des Y pour corriger les défauts d'alignement sur le joint.

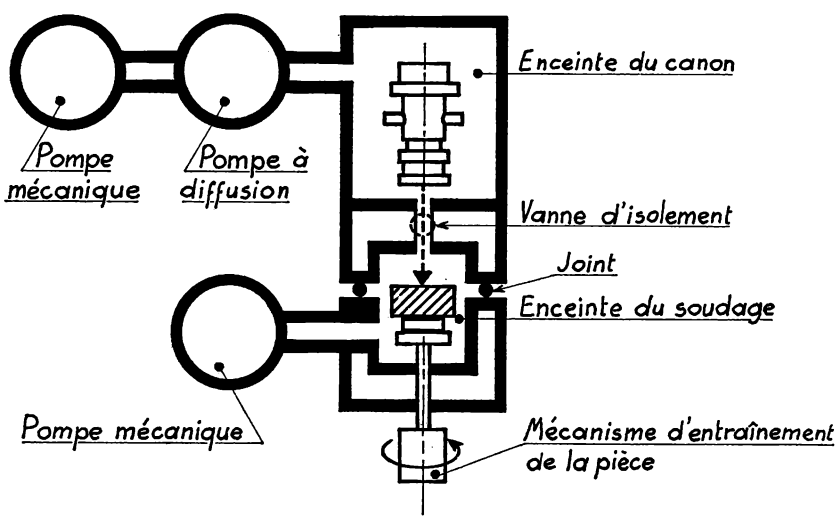


Fig. 15

Principe du soudage sous vide partiel.

— ***Direction du faisceau d'électrons.*** Le faisceau peut être dirigé dans n'importe quelle direction. La zone fondue a la même direction que le faisceau (fig. 13).

— ***Réparation de pièces*** présentant des parties inaccessibles aux moyens habituels ou pouvant être endommagées par l'échauffement dû à l'emploi d'une source à faible énergie spécifique.

— ***Les déformations dues au retrait sont généralement inexistantes*** car la largeur du cordon étant sensiblement constante sur toute l'épaisseur du métal, s'il se produit des tensions celles-ci sont également réparties dans toute l'épaisseur.

De plus, il est possible de pratiquer le préchauffage et le postchauffage en défocalisant le faisceau d'électrons.

PRÉPARATION DES PIÈCES A SOUDER

Les bords à souder ne subissent aucune préparation. L'étroitesse du cordon de soudure impose simplement *un ajustage précis des bords à assembler*, un positionnement et une conduite précise des pièces sous le canon à électrons.

AUTOMATICITÉ

Le fait que l'opérateur se trouve à l'extérieur de la chambre à vide, les vitesses de soudage élevées : 10 à 300 *cm/mn*, la nécessité d'une grande précision de centrage du faisceau d'électrons sur le joint à souder, la grande puissance spécifique, conduisent à l'automaticité du déplacement, soit du canon, soit de la pièce.

De nombreux servo-mécanismes permettent des mouvements relatifs du canon et de la pièce, soit par rotation, soit par translation suivant les axes X Y Z (fig. 14). Ces mouvements, réglables avec précision sont donnés par des moteurs à vitesse contrôlée électroniquement.

On peut : soit déplacer le canon à électrons, soit déplacer la pièce à souder.

LE SOUDAGE SOUS VIDE PARTIEL

La sujétion principale du soudage par bombardement électronique réside dans l'obligation de travailler sous un vide poussé : 5×10^{-4} torr au minimum pour les métaux les plus usuels à 10^{-5} torr pour les métaux très oxydables ou réfractaires.

Principe du soudage sous vide partiel. Cette technique consiste à placer le canon à électrons dans une enceinte où règne un vide de 10^{-4} torr. Les pièces à souder sont placées dans une seconde enceinte où le vide est de l'ordre de 10^{-1} torr. Les deux enceintes sont réunies par une vanne que l'on ouvre au moment du soudage (fig. 15).

On constate que pendant le temps court du soudage, il ne se produit pas d'égalisation des pressions entre les deux enceintes.

LE SOUDAGE HORS VIDE

Des recherches sont en cours pour pouvoir pratiquer le soudage hors vide.

Dans ce cas, l'orifice du canon à électrons doit déboucher au ras de la pièce à souder. Une atmosphère d'hélium peut être créée pour protéger la soudure de l'oxydation et faciliter le transfert des électrons hors vide. Les puissances à mettre en jeu deviennent importantes. Le danger des radiations par rayons X croît considérablement.

AVENIR DU PROCÉDÉ

Cette technique, dont les applications industrielles sont récentes, se développe rapidement.

D'abord réservées à des domaines spéciaux (éléments de fusées ou d'engins spaciaux), les machines à souder par faisceau d'électrons sont, maintenant utilisées dans des fabrications en grande série de pièces en acier (engrenages, pignon de boîte de vitesse d'automobiles).

Une firme américaine de constructions aéronautiques possède deux grandes machines à souder qui servent à fabriquer les longerons et les raidisseurs d'ailes d'avions. Les dimensions de l'enceinte de la plus grande sont :

$$9{,}75\ m \times 3\ m \times 2{,}45\ m.$$

Les quatre pompes primaires et les quatre pompes à diffusion de 0,75 *m* de diamètre amènent l'enceinte de soudage à la pression de 10^{-4} torr en moins de 20 minutes.

Ces deux machines sont équipées d'un circuit de télévision pour l'alignement du canon à électrons, ainsi que d'un viseur électronique du joint.

Avec une tension d'accélération de 60 *kV* et une intensité de 0,5 *A*, le canon à électrons peut souder des pièces de titane de plus de 50 *mm* d'épaisseur.

Il est permis de penser que cette technique trouvera de nombreuses applications dans l'industrie aéronautique et cosmonautique, l'industrie chimique, etc.

Déjà certains équipements mobiles permettent la construction d'ensembles très importants.

Ajoutons que le soudage par bombardement électronique constitue le moyen le plus remarquable dont on dispose pour effectuer le soudage dans le vide stellaire.

CHAPITRE XI

LE SOUDAGE ÉLECTRIQUE PAR RÉSISTANCE

CE PROCÉDÉ DE SOUDAGE EST CARACTÉRISÉ PAR

— **le mode d'apport de chaleur :** celui-ci est dû à l'**effet Joule** provoqué par le passage dans les parties à souder d'un courant électrique à forte intensité (500 à 150 000 *A*) ;

— **une complète autogénéité** (1), puisqu'il n'est jamais, d'une manière générale, fait appel à un métal d'apport ;

— **l'exercice d'une pression** (de moins d'un *N* à 30 000 *daN*), qui localise le passage du courant et réalise le forgeage ;

— **la rapidité d'exécution** due à la suppression presque totale des opérations de préparation ou de finition, et à l'emploi de fortes intensités. **Ainsi,** un point de soudure assemblant deux tôles d'acier doux de 0,8 *mm* d'épaisseur est exécuté en 8 à 12 centièmes de seconde ; deux tôles de 4 *mm* sont soudées en 1 à 3 secondes.

Selon le mode d'application de l'énergie électrique et de la pression, le soudage électrique par résistance est dit : ***soudage par points*** ou ***soudage en bout.***

Soudage par points

ÉTUDE SOMMAIRE DE LA FORMATION DU POINT

Les pièces sont serrées entre deux électrodes. Le courant électrique de forte intensité, circule d'une électrode à l'autre à travers les pièces à souder.

(1) Exception faite pour le soudage de métaux et alliages de nature différente

La quantité Q de chaleur dégagée est donnée par la loi de Joule qu'exprime la formule:

$Q = \frac{1}{J} R I^2 T$, dans laquelle:

J est l'équivalent mécanique de la grande calorie ($J = 4,\ 18 \times 10^3$);

I l'intensité,

T le temps de passage du courant;

R se décompose en cinq éléments (fig. 1):

r_1 et r_2, résistances au contact des électrodes sur la pièce;

r_3 et r_4, résistances ohmiques des parties à souder;

r_5, résistance au contact entre les deux parties.

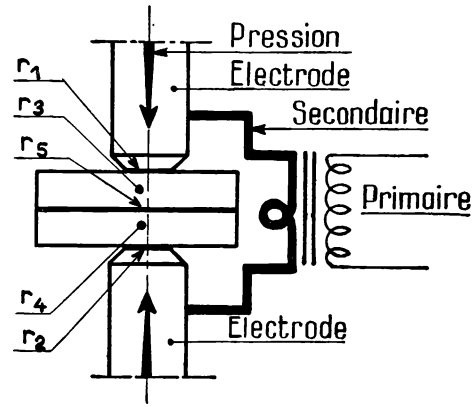


Fig. 1

Pour réaliser la soudure dans de bonnes conditions, il faut faire en sorte que l'échauffement maximal se produise au point de contact: pour cela, on s'efforce de rendre r_1 et r_2 négligeables et de donner à r_5 la plus grande valeur possible.

Sous l'effet du grand dégagement de chaleur, il se forme un *noyau de métal fondu* entouré de *métal plastique* (fig. 2 et 3).

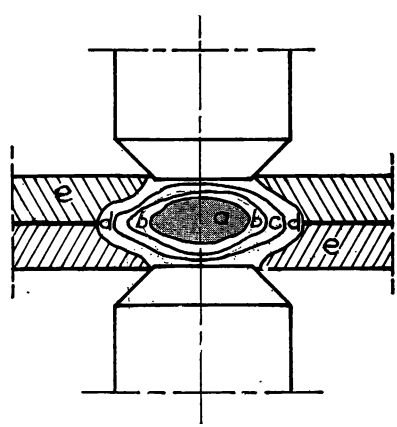


Fig. 2

Les différentes zones du point de soudure.

a) zone portée à fusion;
b) zone plastique: température supérieure à la température critique;
c) zone chauffée à la température critique;
d) zone chauffée à une température inférieure à la température critique;
e) zone froide.

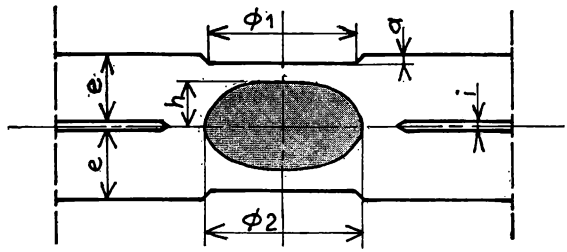


Fig. 3

Dimensions recommandées des points de soudure.

$\varnothing 1$: diamètre de l'extrémité de la pointe d'électrode $= 5{,}04\sqrt{e\ \text{mm}}$;

$\varnothing 2$: diamètre du noyau fondu = diamètre de l'extrémité de la pointe d'électrode $\pm$ 20%;

$h = 0{,}6e \pm 20\%$;

a : empreinte maximale $= \frac{e}{10}$;

i : intervalle maximal entre les tôles $= \frac{e}{10}$.

Si la soudure est faite rapidement, la chaleur n'a pas le temps de se transmettre jusqu'aux surfaces extérieures avant la rupture du courant et l'éloignement des électrodes. Mais, si l'on dégage l'électrode mobile immédiatement après la rupture du courant, on voit la surface du métal rougir sous l'effet de la chaleur, transmise par conductibilité thermique.

Au contraire, si l'on maintient les électrodes en position après la coupure du courant, elles favorisent l'évacuation de la chaleur que l'on peut accélérer par une circulation d'eau, et la température en surface reste relativement basse. Cela permet d'exercer une forte pression qui assurera le forgeage du métal plastique.

Si l'*intensité utilisée est plus petite*, le temps de soudage augmente, on réalise un soudage lent. La température des pièces s'élève, ainsi que celle des électrodes. La température de recuit de ces dernières étant vite atteinte, elles se détériorent rapidement.

D'autre part, le métal, rendu plastique jusqu'en surface, non seulement ne peut plus supporter une pression suffisante pour obtenir le forgeage du point de soudure, mais il garde l'empreinte profonde des électrodes.

De plus, la dispersion de chaleur ainsi provoquée entraîne une plus grande consommation de courant.

Enfin, par suite du dégagement relativement important de chaleur, chaque point de soudure joue le rôle d'une chaude de retrait ce qui entraîne l'apparition de tensions internes et de déformations.

Cette courte étude montre les avantages du soudage rapide : meilleure qualité des soudures, consommation moindre d'électricité, soudures peu marquées, pas ou peu de déformations, possibilité de souder des pièces fragiles qui se déformeraient en soudage lent, possibilité de souder entre eux des métaux à points de fusion très différents, tenue des électrodes améliorée.

LE SOUDAGE PAR POINTS PEUT SE PRATIQUER SUIVANT TROIS PROCÉDÉS :

1° **Soudage par points** réalisé soit par concentration du courant et de la pression entre deux électrodes pointues (fig. 4) : c'est le ***soudage en simple point (en direct),***

— soit en ***soudage indirect*** (fig. 5);

— soit en ***double point série*** (fig. 6).

Le soudage en double point série est le plus employé dans les machines à têtes multiples en raison des avantages qu'il présente sur les deux procédés précédents :

— exécution de deux soudures au lieu d'une seule pour une augmentation de puissance n'excédant pas 25 à 30 %,

— les deux électrodes étant placées d'un même côté de la pièce, l'appareillage de soudage est concentré d'un même côté de la machine, son entretien est plus facile.

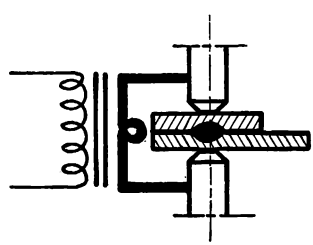


Fig. 4

Principe du soudage direct (simple point).

Par contre, le soudage en double point série ne peut se réaliser que sur un empilage de deux tôles (jusqu'à 10 pour les machines à point simple) :

— la tôle la plus mince doit se trouver du côté des pointes d'électrodes,

— le pas minimal des points est de l'ordre de six fois le diamètre de la soudure,

— l'épaisseur maximale de la tôle la plus mince ne dépasse pas 2 *mm*.

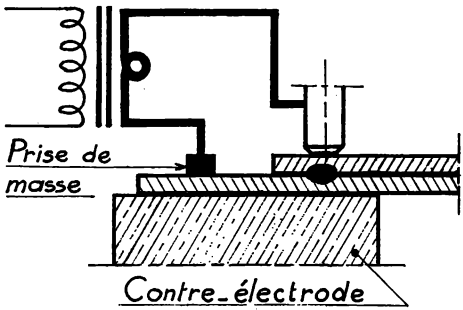


Fig. 5

Principe du soudage indirect.

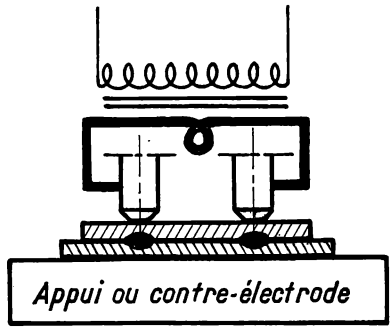


Fig. 6

Principe du soudage en double point série.
Le courant passe d'une électrode à l'autre en traversant les pièces à assembler.

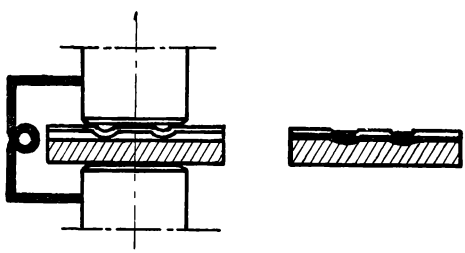


Fig. 7 Après soudage.

2° **Soudage par bossages.** Des bossages sont préparés sur l'une des pièces aux emplacements des points de soudure ; les électrodes sont plates (fig. 7). Les bossages ont pour but de concentrer le courant et la pression aux emplacements des points de soudure.

3° **Soudage à molettes.** Les électrodes sont des disques dits « *molettes* » qui roulent sur les pièces à assembler et les entraînent. La pression est généralement permanente, mais le courant est interrompu et rétabli selon une cadence déterminée et réglable ; on peut ainsi obtenir soit des points régulièrement espacés, soit des points qui se chevauchent et forment une soudure continue rendant le joint étanche (fig. 8).

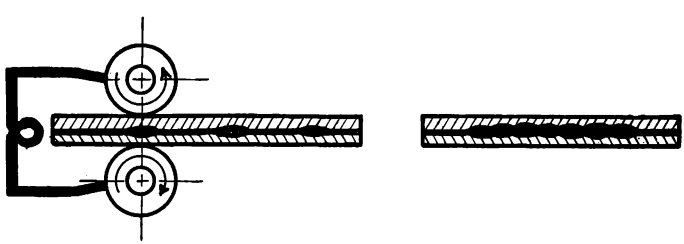


Fig. 8

Soudure par points. Soudure continue.

Actuellement, les épaisseurs d'acier soudables par points varient de quelques dixièmes de millimètre à 2 fois 20 *mm* et celles des alliages légers de 2 fois 0,5 *mm* à 2 fois 8 *mm*.

LE SOUDAGE PAR POINTS EST APPLICABLE A UN GRAND NOMBRE DE MÉTAUX ET ALLIAGES

La soudabilité des métaux et alliages est fonction de leur résistivité (1) **électrique,** on peut, de ce point de vue, les ranger en deux groupes:

1° ***Ceux à grande résistivité électrique et faible conductibilité thermique,*** tels les aciers, qui se soudent avec des intensités relativement faibles et des temps de passage relativement longs.

2° ***Ceux à faible résistivité électrique et à grande conductibilité thermique,*** tels: l'aluminium et ses alliages, les alliages de cuivre, qui se soudent avec de fortes intensités et des temps très courts.

L'acier doux se soude très facilement, ainsi que les *aciers à faible teneur en éléments spéciaux.*

Les aciers trempants sont soudables, mais ils exigent un recuit après soudage car la soudure par suite du refroidissement rapide, est devenue fragile. Ce recuit est effectué automatiquement sur certaines machines à souder.

Les aciers inoxydables au chrome-nickel se soudent très bien par l'emploi d'un courant modéré, sous une pression forte et en un temps de soudage court et précis (pour éviter la précipitation des carbures de chrome).

Le nickel et ses alliages se soudent facilement avec une intensité assez élevée.

L'aluminium, le magnésium et leurs alliages sont soudables à condition d'employer un courant très intense pendant un temps très court, et de contrôler rigoureusement la quantité d'énergie fournie.

Le laiton se soude plus facilement que l'aluminium en employant un courant élevé pendant un temps court.

Le zinc et les alliages contenant du zinc ou du plomb sont très délicats à souder en raison de leur faible température de fusion.

Le cuivre sur cuivre est impossible à souder ou donne une très mauvaise soudure ; les alliages rouges et les bronzes phosphoreux se soudent mieux.

---

(1) La résistivité d'un métal est la résistance électrique d'un fil de ce métal ayant une longueur de 1 *m* et une section de 1 mm^2.

Des métaux et alliages de nature différente sont soudables par points s'ils forment un alliage et si leurs températures de fusion ne sont pas trop différentes.

Le tableau de la page suivante donne les soudabilités des métaux et alliages usuels.

REMARQUE. — Pour souder deux tôles d'acier doux galvanisé on intercale entre les tôles, et pour chaque point, une fine lamelle ($e = 0{,}2$ *mm*) de cuivre afin de former un alliage qui évite l'oxydation du zinc entre les deux tôles autour du point de soudure.

Le cuivre et le zinc fondus cèdent la place au point de soudure acier-acier en formant autour de celui-ci un alliage protecteur.

LA SUCCESSION DES DIFFÉRENTES PHASES MÉCANIQUES ET ÉLECTRIQUES DU CYCLE DE SOUDAGE EST NOMMÉE SÉQUENCE

La séquence est dite à 1, 2... et jusqu'à 8 *fonctions* selon le nombre d'opérations à contrôler.

Les séquences les plus courantes sont à quatre fonctions: *accostage*, *soudage*, *forgeage*, *temps mort*.

— **Accostage :** il a pour but d'établir un bon contact entre les pièces. Il est réalisé par *descente et pression* de l'électrode supérieure.

Les tôles doivent être préparées pour rendre facile l'accostage, car un accostage défectueux entraîne des pertes de courant (fig. 9 et 10). Le meilleur accostage est réalisé par bossage.

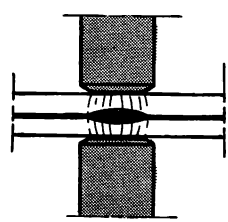


Fig. 9
Bon accostage.

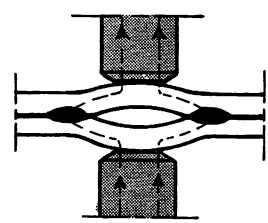


Fig. 10
Accostage défectueux.

L'accostage désigne également le temps compris entre la mise en mouvement de l'électrode supérieure et le début du soudage.

— **Soudage:** lorsque l'accostage est assuré, le courant passe pendant un temps bien déterminé ; le noyau de fusion se forme entre les deux épaisseurs à souder.

Le temps de soudage correspond au temps de fermeture du contacteur.

Électrode sur		Zinc	Monel 26/30 % Cu	Nickel	Cupro-nickel 15%20 % Ni	Bronze phosphoreux	Laiton 25/40 % Zn	Cuivre	Duralumin et Zicral	Aluminium et duralinox	Acier inoxydable	Acier doux				
												Chromé	Cadmié	Etamé-galvanisé plombé	Calaminé	Décapé
Acier doux	Décapé	I	P	P	M	P	M	I	M	M	E	E	B	B	B	O
	Calaminé	I						I			P	P	P	M	B	
	Plombé, galvanisé, étamé.....	P	P	P	M	M	M	I	P	P	B	B	B	P		
	Cadmié	P	P	P	M	M	M	I	M	M	B	B	B			
	Chromé	I	P	P	M	M	I	I	I	I	E	E				
Acier inoxydable ..		I	P	P	M	M	I	I	I	I	O					
Aluminium et duralinox.....		P	M	M		P	P	I	B	B						
Duralimin et zicral		P	M	M		P	P	M	B							
Cuivre		I	M	M	P	P	P	I								
Laiton 25/40%Zn..		P	P	P	B	B	B									
Bronze phosphoreux		M	P	P	B	B										
Cupro-nickel.....		I	B	B	E											
Nickel		I	B	E												
Monel		I	E													
Zinc		P														

Symboles affectés à la sondabilité: *O* = optimale; *E* = excellente; *B* = bonne; *P* = passable; *M* = mauvaise; *I* = impossible.

— **Forgeage ou maintien de la pression :** après soudage, la pression est maintenue pendant la solidification du point, d'une part *pour éviter la retassure du métal fondu* et d'autre part *pour souder par forgeage* la zone de métal rendue plastique. Le retrait est compensé par un léger applatissement du point soudé (fig. 11).

Le temps de maintien est celui qui s'écoule entre l'ouverture du contacteur et le desserrage des électrodes.

— **Cadence ou temps mort :** c'est l'intervalle de temps entre deux cycles consécutifs dans le cas de marche à la volée.

C'est le temps pendant lequel l'électrode supérieure remonte.

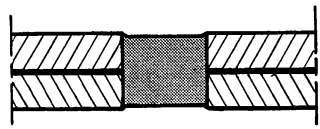


Fig. 11

Pression normale.
Le retrait, sous l'effet de la pression, provoque un léger amincissement.

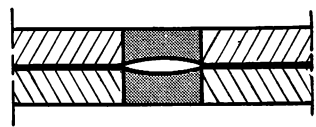


Fig. 14

Pression trop faible, le point est creux (retassure).

Les figures 12 et 13 montrent deux exemples de séquences : l'une à quatre fonctions, l'autre à sept, cette dernière s'applique à la soudure des aciers trempants.

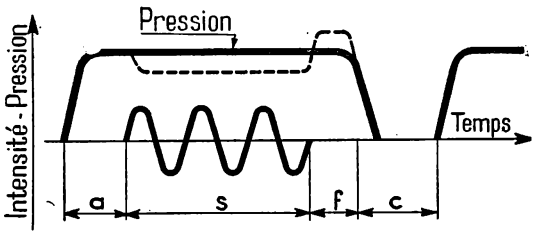


Fig. 12

Séquence de soudage à 4 fonctions
a: accostage
s: soudage
f: forgeage
c: cadence
La pression exercée pendant le soudage et le forgeage est { sensiblement constante ou variable }

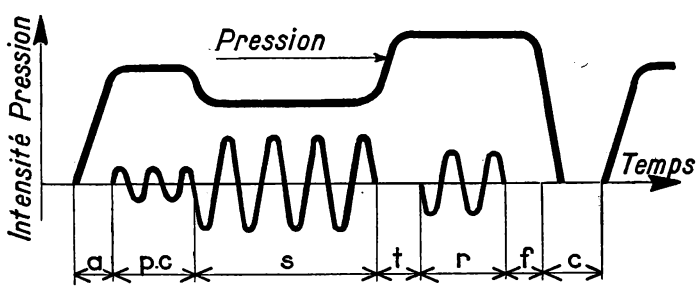


Fig. 13

Séquence de soudage à 7 fonctions.

a : accostage
Pc: préchauffage (intensité faible Ip.)
s : soudage (forte intensité Is)
t : trempe
r : recuit (intensité Ir. Ip < Ir < Is)
f : forgeage
c : cadence.

LE SOUDAGE PAR POINTS DÉPEND, DU POINT DE VUE DE LA MARCHE DE L'OPÉRATION ET DE SON RÉSULTAT, DE TROIS ÉLÉMENTS PRINCIPAUX, DONT LES VARIATIONS SONT LIÉES.

Ce sont: la *pression* qui, avec le *profil des électrodes* ou des *bossages* détermine le facteur R de la loi de Joule ; l'*intensité* I et le *temps de passage du courant.*

— **La pression** assure l'*accostage* et réalise le *forgeage.* Elle est fonction à la fois de la nature et de l'épaisseur du métal à souder. Plus le métal est dur et résistant, plus la pression unitaire ($da\ N/mm^2$) doit être élevée.

Une pression insuffisante provoque un creux entre les tôles (fig. 14). Une pression exagérée exige une intensité plus élevée car elle diminue la résistance électrique entre les tôles ; elle laisse des empreintes plus profondes.

— **L'intensité ;** une soudure de tôles d'acier doux peut être obtenue de deux façons:

a) soit avec une intensité élevée pendant un temps court et en utilisant une pression élevée: c'est le *soudage rapide.*

b) soit avec une intensité plus faible pendant un temps plus long avec une pression faible: c'est le *soudage lent.*

REMARQUE. — Nous avons vu précédemment qu'il y a intérêt à adopter le soudage rapide, cependant il ne peut être appliqué aux tôles calaminées. En effet, c'est le passage du courant qui élimine la calamine par étincelage avant soudage; toutefois, la pression doit être environ le double que pour les tôles décapées.

Le temps de passage du courant est fonction de la nature et de l'épaisseur du métal à souder. Pour le soudage de l'acier il est d'autant plus long que le métal est sale ou que sa teneur en carbone est élevée. Il faut choisir le temps le plus court compatible avec la pression et le courant disponibles.

LES ÉLECTRODES

Matière : le métal de base des électrodes est le *cuivre*, en raison de sa grande conductibilité électrique. Il est employé pur (cuivre électrolytique écroui), ou allié au chrome, au cobalt, au tungstène, etc., lorsqu'une plus grande résistance mécanique est recherchée ou pour éviter le collage des électrodes au métal soudé.

Forme des pointes : elles sont ***plates*** ou en ***dôme.*** Les plates donnent des points de soudure de diamètre bien déterminé. Le diamètre terminal de l'électrode est donné par la formule $d = 2e + 0$ à $4\ mm$, en forçant le terme numérique d'autant plus que l'épaisseur e est faible (fig. 15); ou, par la formule $d = 5{,}04\sqrt{e}$. Dans la fabrication en grande série on emploie fréquemment des pointes sphériques de 80 *mm* de rayon.

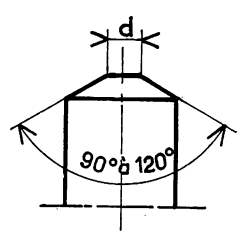


Fig. 15

Pour avoir des soudures invisibles sur une face on emploie contre cette face une pointe plate dont le diamètre *d* est au moins égal à 2,5 *d* normal (fig. 16).

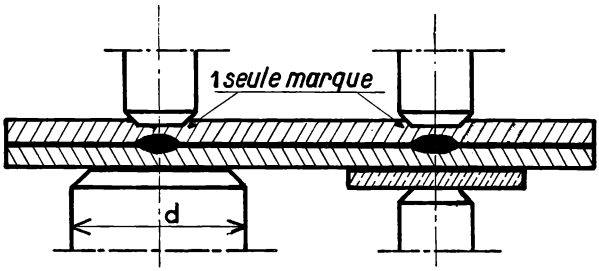


Fig. 16

Emploi d'une électrode large ou, à défaut, d'une plaque de cuivre interposée.

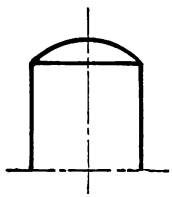


Fig. 17

Les pointes en dôme (fig. 17) assurent un meilleur accostage que les pointes plates et un bon contact, même si la présentation des pièces est oblique.

Les électrodes peuvent être droites ou déportées.

Dès que la cadence atteint 800 points par minute, ou l'épaisseur 1,5 + 1,5 *mm*, les électrodes doivent être refroidies par circulation d'eau (fig. 18).

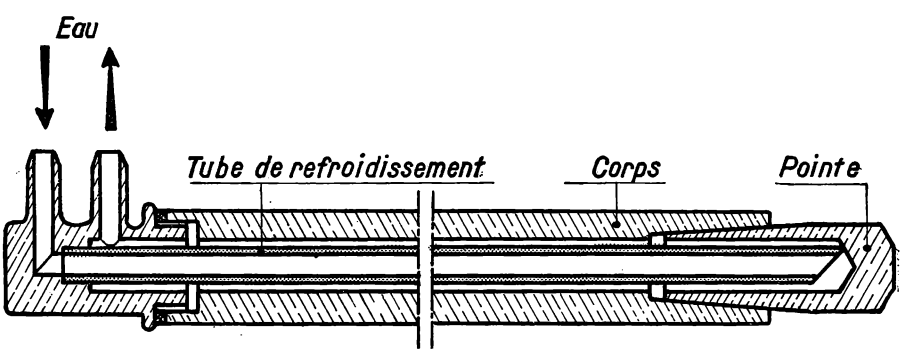


Fig. 18

Entretien. Il n'est possible de réaliser de bonnes soudures qu'avec des électrodes en parfait état. Les électrodes creuses, mal ajustées ou ayant un dépôt de métal sur la pointe entraînent une baisse d'intensité et un crachement en forme de bourrelet sur un côté du point.

Les électrodes se réparent soit au tour, soit à la lime (éviter l'emploi de la toile émeri: celle-ci laisse souvent des grains qui détériorent à nouveau l'électrode).

LES MACHINES A SOUDER PAR POINTS

Ce sont de véritables machines-outils comportant un ensemble électrique et un ensemble mécanique (fig. 19).

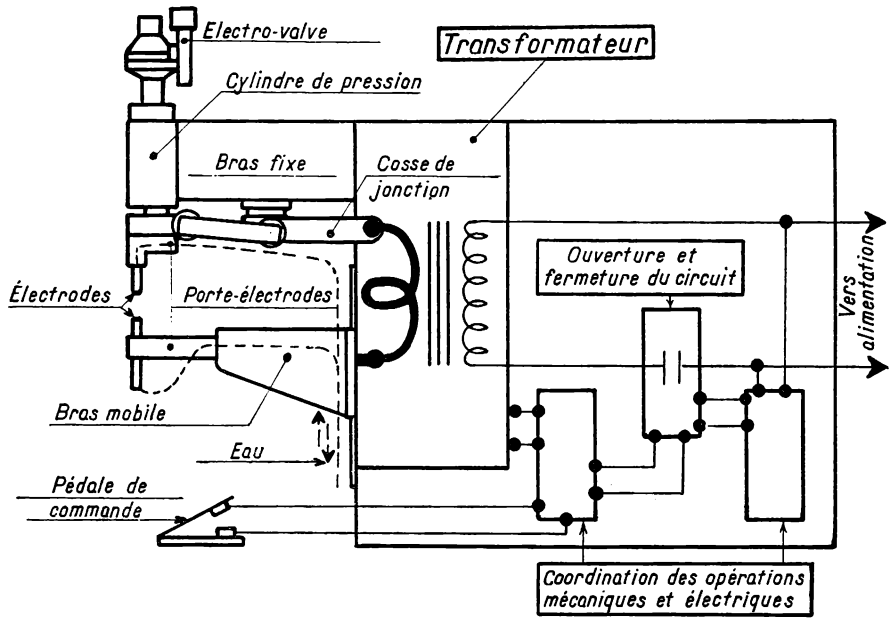


Fig. 19

Schéma d'une machine fixe à souder par points (alimentation monophasée).

Le bras supérieur est fixe. Le coulisseau porte-électrode est, dans ce cas, animé d'un mouvement de descente rectiligne.

L'ENSEMBLE ÉLECTRIQUE EST ESSENTIELLEMENT CONSTITUÉ PAR :

a) **un transformateur de soudage** branché sur le secteur alternatif, monophasé ou triphasé. *Il abaisse la tension et augmente l'intensité.* Il présente une large gamme de puissances qui nécessite de nombreux plots de réglage ;

b) **un circuit secondaire depuis le transformateur jusqu'aux électrodes ;**

c) **un très complexe appareillage électrique et électronique de commande** qui a pour fonctions principales:

— la *fermeture et l'ouverture du circuit primaire du transformateur* par contacteurs ;

— le *réglage de l'intensité du courant de soudage* par rhéostat, par commutateur ou électroniquement ;

— le *réglage du temps de soudage* par temporisateur électromagnétique ou par réglage électronique ;

— la *coordination des opérations mécaniques et électriques constituant la séquence.* Les temps de ces opérations sont réglés par des temporisateurs électroniques qui jouent le rôle d'interrupteurs robustes de haute précision (gammes de temporisation de 0,04 seconde à plus de 13 secondes).

NOTA. — Pour le soudage de l'aluminium et des alliages légers, on emploie des **machines à accumulation d'énergie** par self produisant une décharge puissante et bien dosée.

L'ENSEMBLE MÉCANIQUE COMPREND

a) **deux bras** qui portent chacun une *électrode.* Pendant le soudage, le bras inférieur est immobile ; c'est le bras supérieur qui se déplace en décrivant soit une trajectoire rectiligne (*machines à guidage rectiligne*), soit une trajectoire circulaire (*machines à bras pivotant*).

Dans les machines simples, le bras inférieur est fixe ; dans d'autres machines, ce bras est réglable en hauteur pour permettre le passage de pièces encombrantes entre les deux électrodes.

b) **un mécanisme destiné à amener l'électrode supérieure en contact avec la pièce et à exercer une certaine pression.** Il peut être:

— ***une commande par moteur électrique et came,*** solution coûteuse et brutale.

On trouve, plus couramment:

— ***la commande par pédale,*** où l'effort engendré par l'opérateur est transmis en deux temps au moyen d'un jeu de leviers: 1° approche de l'électrode supérieure sur la pièce ; 2° mise en pression par écrasement d'un certain nombre de rondelles Belleville.

Cette commande convient pour les machines de faible puissance fonctionnant à une cadence lente (quelques dizaines de points par minute);

— ***la commande pneumatique:*** l'admission et l'échappement sont commandées par électrovalve, la pression est réglée facilement par un détendeur et transmise directement au porte-électrode.

La commande pneumatique se rencontre sur les machines de moyenne puissance (fig. 20).

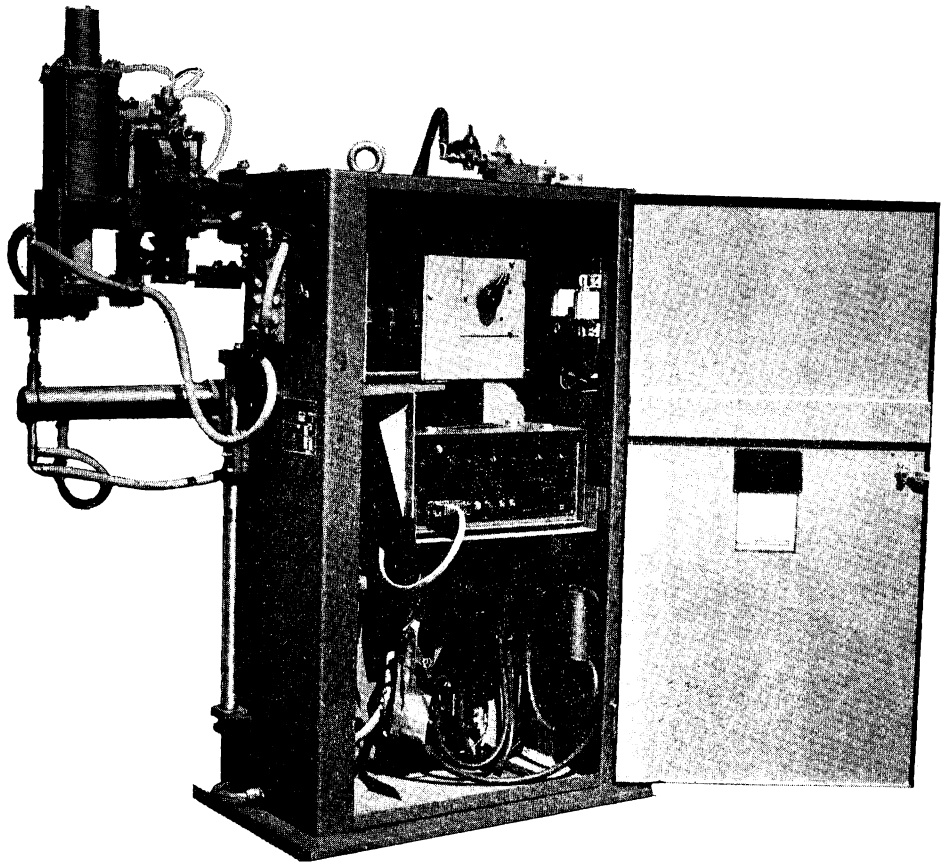


Fig. 20. — **Machine à souder Languepin, à commande pneumatique et descente rectiligne.**

(Document La Soudure Électrique Languepin, St Denis).

Bras réglables en longueur (300 à 600 mm) et en écartement (70 à 600 mm).

Capacité maximale : 6 + 6 mm sur acier doux.

Pour un transformateur monophasé de 65 kVA, la puissance en soudage est réglable de 60 à 170 kVA; l'intensité secondaire maximale en court-circuit est de 30 000 A.

— *la commande hydraulique* (à eau ou à huile) qui est employée pour obtenir de fortes pressions, des cadences élevées (plus de 150 points/minute) ou un allègement du cylindre de pression, notamment dans les pinces à souder et les machines suspendues.

c) **un bâti** en tôles soudées ; rigide pour empêcher toute déformation due aux efforts de flexion ; accessible pour faciliter l'atteinte des différents organes mécaniques et des circuits électriques.

LES MACHINES A SOUDER PEUVENT ÊTRE FIXES OU MOBILES

Les machines fixes (fig. 19) sont employées pour le soudage de pièces peu encombrantes ou pour la production en série, dans ce cas on emploie des machines à points multiples qui, en construction automobile, par exemple, comportent jusqu'à cent têtes de soudage; tous les points étant exécutés généralement en une seule fois.

Les machines suspendues sont accrochées à une potence ou à un pont roulant, et orientables dans toutes les directions. Elles se font en toutes puissances (jusqu'à 20 + 20 *mm*); elles permettent le soudage de pièces encombrantes ou lourdes.

Les postes à pinces, dans lesquels seuls les organes de soudage (les pinces) sont mobiles. *Les pinces* sont très maniables et souvent conçues spécialement pour une fabrication bien déterminée. Elles sont réunies au *poste de soudage* (transformateur, groupe pneumo-hydraulique pour la mise en pression des pinces, appareillage de circulation d'eau) et à l'*armoire de commande* par des *câbles souples.*

Les pinces peuvent être du type *C* (l'électrode mobile se déplace par translation) ou du type *articulé* (les deux bras tournent autour d'un axe commun) (fig. 21).

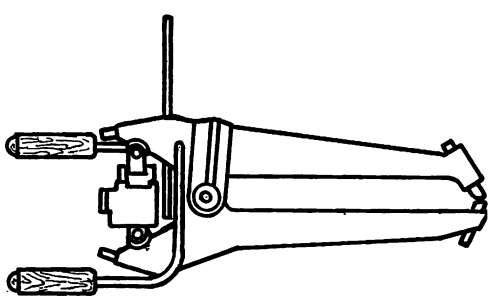


Fig. 21

Pince de soudage articulée.

Les carottes de soudage sont des pinces unipolaires (une seule électrode), la masse entière de l'assemblage étant mise à l'autre polarité. L'élément de mise sous pression n'est parfois que l'effort exercé par l'opérateur, souvent la carotte prend appui sur un élément fixe d'un bâti par l'intermédiaire d'un cylindre à pression hydraulique.

CARACTÉRISTIQUES DE SOUDAGE D'UNE MACHINE A SOUDER PAR POINTS

Puissance : c'est le débit possible dans le circuit secondaire ; elle est fonction :

a) de la tension secondaire à vide du transformateur ;

b) de l'écartement et de la longueur des bras, de la masse magnétique introduite, et de l'épaisseur à souder.

Ainsi, pour un même transformateur on trouve :

190 *KVA* pour une longueur de bras égale à 200 *mm* et 50 *KVA* pour une longueur de bras égale à 1 200 *mm*.

Cette notion de puissance est donc insuffisante pour caractériser électriquement une machine ; les spécifications techniques valables sont :

l'intensité secondaire, l'effort de serrage et le facteur de marche maximal.

Intensité secondaire maximale. Elle est définie dans les conditions suivantes : tension primaire égale à la valeur nominale, bras à l'écart minimal et à longueur donnée, la machine soudant sur éprouvettes de la capacité maximale.

Cette intensité et la pression maximale déterminent les épaisseurs maximales à souder.

Facteur de marche : c'est, en fonctionnement à la volée, le rapport du temps de soudage au temps total employé pour exécuter un point.

Le facteur de marche maximal est celui qui conduit à l'échauffement limite du transformateur ou du reste de la machine.

EXEMPLE : à la cadence de 60 points/minute avec un temps de soudage de 0,25 seconde, le facteur de marche est : $\frac{60 \times 0{,}25}{60} = 25\ \%$.

C'est le facteur de marche maximal qui limite la cadence de production et les conditions de service (continu ou intermittent) de la machine.

EXEMPLE : soit une machine soudant 3 + 3 *mm* avec un facteur de marche maximal de 15 %, le temps de soudage donnant de bons résultats est de 2,25 secondes ; *sa cadence continue c* à ne pas dépasser sera 4 points par minute, en effet on a : $\frac{c \times 2{,}25}{60} = 0{,}15$ d'où $c = \frac{0{,}15 \times 60}{2{,}25} = 4$.

LA PRATIQUE DU SOUDAGE PAR POINTS

EMPLACEMENT ET RÉSISTANCE DES SOUDURES

L'assemblage doit être choisi de façon que les points de soudure soient sollicités de préférence au *cisaillement*, car un point résiste mal à *l'extension*, médiocrement à la *torsion* et de *façon optimale au cisaillement par traction.*

Les points soudés, exécutés normalement, qui assemblent des plats en acier doux ont une résistance au cisaillement supérieure à celle de boulons en acier doux de même diamètre.

REMARQUE. — On admet un coefficient de sécurité supérieur *4* pour les points soudés et *3* pour les boulons.

PRÉPARATION (fig. 22)

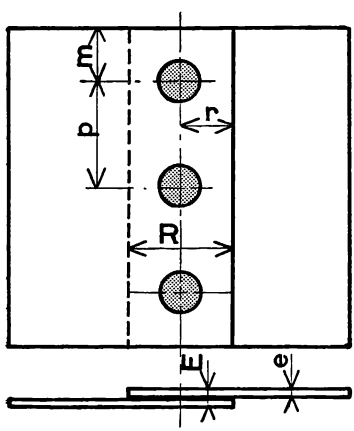


Fig. 22

Pince minimale : $r = 2e + 4$ *mm.*

Recouvrement minimal : $R = 4e + 8$ *mm.*

Distance au bord minimale : $m = 2e + 4$ *mm.*

Pas : si l'on soude un point trop près d'un autre, une partie du courant passe à travers ce dernier et est perdue pour la soudure.

Pour E (épaisseur totale) $= 2e$ ne pas descendre au-dessous de $P = 12e$ pour $e > 3$ *mm* et $P = 13e + 4$ pour $e \leqslant 3$ *mm.*

Pour $E = 3e$, prendre
$p \geqslant 16e$ pour $e > 3$ *mm*
$P \geqslant 18e + 4$ pour $e \leqslant 3$ *mm.*

État des pièces : utiliser de préférence du *métal propre*, exempt de rouille, d'une couche épaisse de calamine, de peinture, etc., car ces corps nuisent au passage du courant. Les joints des tôles présentant ces défauts doivent être *décapés* ou *meulés*, ou alors soudés avec des machines munies de dispositifs spéciaux tels que *préchauffage.*

La graisse et l'huile ne gênent pas le soudage.

Une couche faible de calamine disparaît pendant le soudage sous forme d'étincelles (soudage lent avec pression élevée).

Les revêtements électrolytiques ne nuisent pas à la qualité de la soudure, mais ils encrassent rapidement les électrodes. Un refroidissement énergique des électrodes est nécessaire:

a) pendant le soudage des fers blancs, tôles plombées ou galvanisées en raison du bas point de fusion du revêtement ; toutefois la couche de métal protecteur est généralement détruite au droit des points sur les tôles d'une épaisseur supérieure à 1,2 *mm* ;

b) pendant le soudage des tôles chromées ou nickelées, afin d'éviter l'oxydation des points.

SOUDAGE DES ACIERS GALVANISÉS

Si les tôles minces galvanisées sont soudées dans de bonnes conditions, les points de soudure présentent des caractéristiques mécaniques analogues à celles des points exécutés sur tôle non protégée.

Il est recommandé d'employer des électrodes en alliage *cuivre-chrome* ou mieux, en alliage *cuivre-zirconium* à extrémité sphérique. Cette forme a l'avantage de produire une empreinte plus petite qu'une extrémité plane, ce qui a pour conséquence de moins perturber la couche de zinc; il en résulte une meilleure résistance à la corrosion.

Par rapport au soudage de la tôle non protégée, il faut augmenter notablement l'intensité du courant et diminuer l'effort d'accostage. *L'effort de forgeage* doit être considérablement augmenté par rapport à *l'effort de soudage.*

Pour éviter que les pointes d'électrodes arrachent la couche de zinc protectrice, il ne faut commencer à souder qu'après avoir exécuté une dizaine de points sur des chutes galvanisées afin que les pointes d'électrodes se recouvrent de zinc.

RÉGLAGE DES MACHINES

Pratiquement, il se fait en deux temps :

1° **détermination du profil et du diamètre des pointes d'électrodes, ou détermination des bossages ;**

2° **évaluation de la pression et réglage de l'intensité et du temps de passage du courant.**

En faisant varier ces trois derniers paramètres, il est possible de trouver un grand nombre de combinaisons qui donnent satisfaction, c'est-à-dire l'énergie W de soudage, entre deux limites: soudage lent et soudage rapide.

NOTA. — Sauf cas particuliers, il faut tendre à réaliser un soudage rapide.

Le tableau ci-dessous indique les données applicables au soudage point par point de deux tôles d'égale épaisseur en acier à basse teneur en carbone sur machines monophasées équipées de pointes d'électrodes tronconiques.

Groupe d'épaisseur de tôles *mm*	Effort sur électrodes *daN*			Courant de soudage *A*			Temps de soudage *ms*		
	Faible	Moyen	Elevé	Faible	Moyen	Elevé	Faible	Moyen	Elevé
0,50 0,62	45	80	120	4 500	5 000	5 600	280	100	100
0,63 0,77	55	100	150	4 800	5 800	6 600	340	140	120
0,78 0,97	70	130	195	5 200	6 500	7 400	440	180	140
0,98 1,25	90	160	240	5 700	7 400	8 300	520	220	160
1,26 1,56	115	200	300	6 300	8 400	9 500	700	280	200
1,57 2,01	145	250	375	6 700	9 300	10 400	900	360	280
2,02 2,49	180	310	465	7 400	10 300	11 600	1 140	440	360
2,50 3,20	230	400	600	8 600	12 100	13 700	1 400	560	500

EXEMPLE : réglages applicables au soudage de 2 tôles de 1 *mm* d'épaisseur.

a) ***Soudage exécuté avec effort faible et courant faible.***
Effort exercé sur les électrodes, $F = 90$ *da N.*
Courant de soudage $I = 5700$ *A.*
Temps de soudage $t = 520$ *ms.*

b) ***Soudage exécuté avec effort moyen et courant moyen.***
$F = 160$ *daN.* $I = 7400$ *A.* $t = 220$ *ms.*

c) ***Soudage exécuté avec effort élevé et courant élevé.***
$F = 240$ *daN.* $I = 8\,300$ *A.* $t = 160$ *ms.*

LE SOUDAGE PAR BOSSAGES

Les bossages sont des protubérances obtenues par emboutissage, matriçage, tournage, etc. Les figures 23 et 24 en donnent deux exemples.

Les principaux avantages de ce procédé sont:

— accostage facile et très bon;

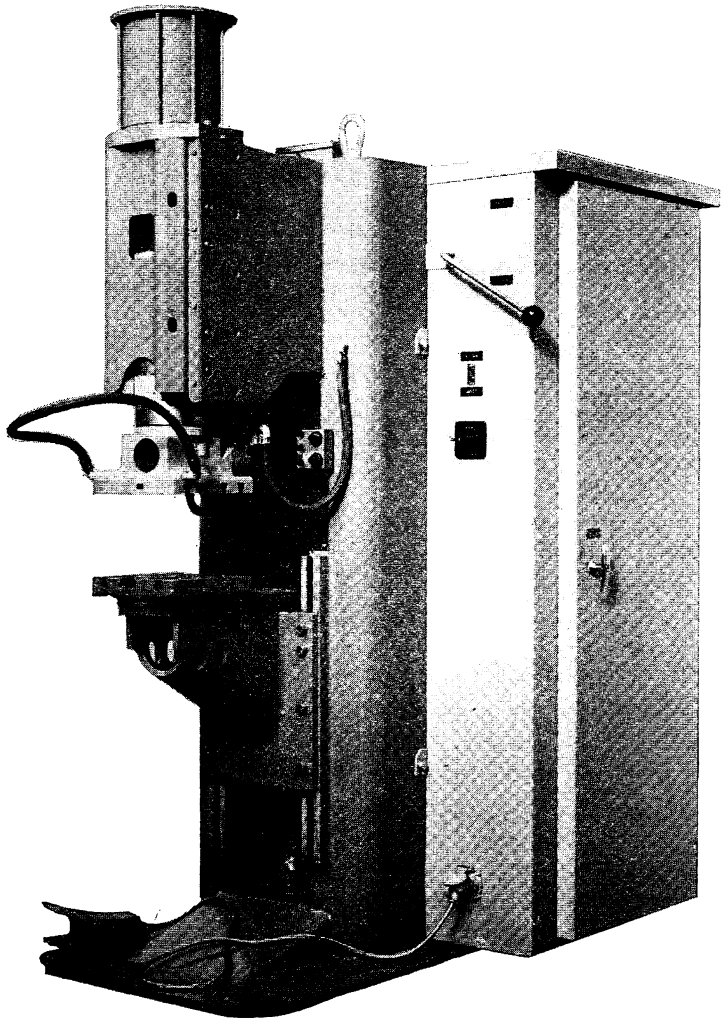


Fig. 25. — **Presse à souder Languepin, type PRP 2055.**
(Document La Soudure Électrique Languepin, St Denis).

Effort de soudage maximal : 2000 daN.

Puissance conventionnelle à 50 % : 190 kVA.

Puissance maximale en soudage : 580 kVA pour une longueur de bras (distance de la face avant du bâti au centre des plateaux) de 500 mm et 780 kVA pour une longueur de bras de 300 mm. Intensité secondaire maximale en court-circuit : 56 000 A (bras de 500 mm) et 76 000 A (bras de 300 mm).

Capacité maximale de soudage sur acier doux :

a) Soudage par points : 9 + 9 mm ;

b) Soudage par bossages : 150 mm² à 240 mm², selon la longueur des bras.

— possibilité de souder plusieurs points simultanément (fig. 7) ;

— usure réduite des électrodes, car leur surface de contact avec les pièces peut être importante puisqu'elles n'assurent pas la localisation du courant et de l'effort ;

— il est possible de placer les soudures très près les unes des autres ;

— exécution de soudures continues étanches en préparant les pièces avec un jonc, une couronne ou un chanfrein.

L'augmentation de la section soudée nécessite des machines plus importantes qu'en soudage par points. Ces machines, toujours à descente rectiligne du bras supérieur, sont équipées de plateaux munis de rainures en T pour faciliter le positionnement relatif des outillages de soudage, elles sont appelées « presses à souder » (fig. 25).

Fig. 23
Bossage tronconique pour tôle de 2,5 à 6 mm.

Fig. 24
Bossage en dôme pour tôle de 0,6 à 2 mm.

SOUDAGE DE PLUSIEURS ÉPAISSEURS

Les machines à souder peuvent souder jusqu'à dix feuilles de tôle dont chaque épaisseur correspond à la capacité de la machine, elles peuvent également souder deux épaisseurs inégales mais la plus faible épaisseur devra être réduite légèrement (tableau fig. 26).

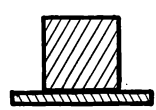
2 épaisseurs égales	2 épaisseurs inégales	3 épaisseurs égales	3 épaisseurs inégales	ronds en croix
				
5+5	4+40	4+4+4	3+30+3	35+35

Fig. 26
Capacité de soudage sur pièces propres de petites dimensions pour une machine de puissance maximale: 50 kVA

Pour souder deux tôles d'épaisseur différente, les diamètres des extrémités d'électrodes doivent être appropriés à l'épaisseur de la tôle avec laquelle l'électrode est mise en contact.

Les conditions de soudage sont généralement analogues à celles recommandées pour le soudage de tôles d'une épaisseur égale à celle de la tôle la plus mince.

Lorsque l'on soude plus de deux épaisseurs égales de tôles il ne se forme qu'un seul noyau qui s'étend de façon continue à travers la ou les tôles intérieures.

Le forgeage mécanique de la soudure a une valeur beaucoup plus faible que lors du soudage de deux tôles, ce qui peut entraîner des soufflures et des retassures dans le noyau de soudure. On améliore le forgeage en appliquant une pression plus élevée.

LES MACHINES A SOUDER PAR RÉSISTANCE A DÉCHARGE DE CONDENSATEURS

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Il consiste à charger une batterie de condensateurs à une tension déterminée et réglable et à décharger l'énergie ainsi accumulée $\left(Q = \frac{1}{2} CU^2\right)$ (1) dans un transformateur de soudage spécialement conçu.

L'ENSEMBLE ÉLECTRIQUE COMPREND (fig. 27) :

Un transformateur d'alimentation alimenté côté primaire soit en monophasé, soit en triphasé ou encore, en biphasé.

La tension de charge de ce transformateur peut varier grâce à des prises de réglage reliées à un commutateur.

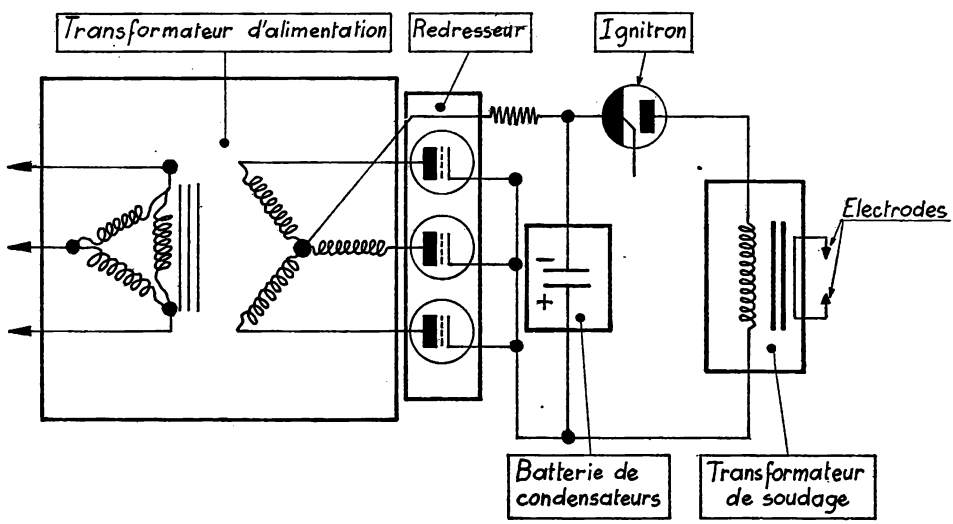


Fig. 27

Schéma de l'ensemble électrique d'une machine à souder à décharge de condensateurs.

Un redresseur, généralement à lampes, relié à
Une batterie de condensateurs.

(1) C = capacité du condensateur.
U = tension.

Un interrupteur électronique de décharge (*ignitron*) qui, lorsque la tension pré-réglée est atteinte, réalise la liaison des condensateurs chargés avec le transformateur de soudage.

FONCTIONNEMENT

En appuyant sur la pédale, on provoque la charge de la batterie puis le serrage des électrodes. Dès que le contrôle d'effort est fermé, la décharge s'effectue.

La décharge traverse le primaire du transformateur de soudage et induit ainsi dans le secondaire un courant intense.

L'opérateur n'a pas à intervenir pour régler le temps de soudage qui est fixé par les caractéristiques de la machine. *L'ensemble des opérations est automatique.*

AVANTAGES DES MACHINES A DÉCHARGE DE CONDENSATEURS PAR RAPPORT AUX MACHINES MONOPHASÉES OU TRIPHASÉES

— ***Un appel de puissance très faible sur le réseau d'alimentation.*** Si l'on peut admettre un temps de charge assez long, il est possible d'accumuler une quantité importante d'énergie avec une faible puissance. A paramètres égaux (épaisseur des pièces, cadence, etc.) la puissance nécessaire est 10 à 15 fois inférieure à celle des machines monophasées standard et 3 à 5 fois inférieure à celle des machines triphasées.

— ***Une très grande régularité des soudures*** car l'énergie accumulée dans les condensateurs est indépendante des chutes de tension temporaires pendant la charge. De plus, les variations de tensions pouvant se produire dans le réseau d'alimentation n'ont aucune influence sur la soudure, la machine étant isolée du réseau d'alimentation pendant la séquence soudage.

UTILISATION

Ces machines sont particulièrement conçues pour le soudage de l'aluminium et des alliages légers qui exige l'utilisation d'une grande énergie pendant un temps très court. Elles sont employées également pour le soudage des métaux et alliages non ferreux (titane, nickel, cuivre et alliages, etc.), et l'acier inoxydable.

ESSAIS DES SOUDURES

Les machines modernes exécutent avec constance des points de qualité parfaite lorsqu'elles sont bien réglées.

Le réglage est vérifié en soumettant les points de soudure, après refroidissement complet, à des essais destructifs qui permettent d'apprécier leur diamètre, leur régularité et leur résistance.

NOTA. — Ni les rayons X, ni les ultra-sons ne sont en mesure, pris séparément, de donner une certitude quant à la qualité du point de soudure. Cependant, l'utilisation conjointe des deux procédés permet d'obtenir une bonne appréciation d'ensemble de la qualité.

ESSAI DE CISAILLEMENT PAR TRACTION

Une éprouvette, représentative de l'assemblage à réaliser (fig. 28), est soumise à l'extension dans *une machine de traction.* Les points sont rompus par cisaillement.

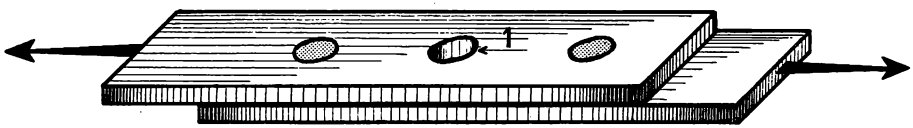


Fig. 28

Le point 1 soudé le premier est éliminé par perçage.

Le tableau ci-après donne quelques résistances minimales que l'on peut obtenir avec des points normaux.

Acier doux		Acier inoxydable 18/8		Duralumin et duralinox	
e *mm*	R *daN*	e *mm*	R *daN*	e *mm*	R *daN*
0,5	150	0,6	250	0,6	60
1	400	0,8	375	0,8	100
1,5	700	1	550	1	140
2	1 000	1,2	700	1,2	190
3	2 000	1,5	1 000	1,6	300
4	3 000	2	1 500	2	425
5	4 000	2,5	2 000	2,5	600
6	5 000	3	2 500	3	800

ESSAI DE DÉBOUTONNAGE

Deux pièces sont séparées l'une de l'autre à l'aide d'un burin à fourche. Comme le noyau de soudure a une résistance au cisaillement supérieure à celle de la tôle on obtient un trou dans l'une des pièces (fig. 29).

Par cet essai on observe approximativement le *diamètre* du point et surtout la *régularité* d'une suite de points.

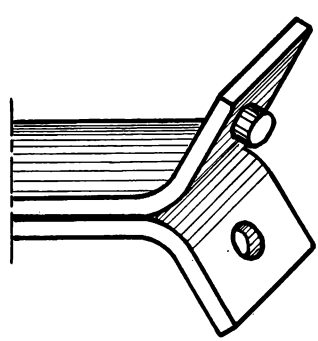


Fig. 29

ESSAI DE TORSION

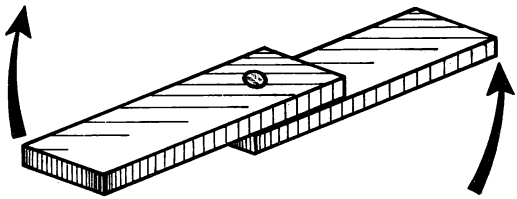


Fig. 30

Si l'on fait tourner dans leur plan d'assemblage les deux parties d'une éprouvette soudée par un seul point (fig. 30) celui-ci se rompt après une certaine torsion dont on mesure l'angle.

La valeur de l'angle de torsion est liée à la *résilience* de la soudure. Le point cassé permet de déterminer le diamètre de la zone fondue et d'examiner sa *texture.*

SOUDAGE A MOLETTES

Le soudage à molettes est par excellence le procédé de grande productivité réalisant *automatiquement des soudures étanches.*

Les machines de soudage à molettes (photographie de couverture) sont, dans l'ensemble, semblables aux machines à souder par points, les électrodes étant constituées par les molettes ; elles comportent en plus un moteur et un mécanisme destinés à entraîner une ou les deux molettes. Parfois les électrodes sont constituées par un *mandrin* fixe, supportant les pièces à souder, et une *molette* se déplaçant en roulant, ou inversement. Actuellement, elles peuvent souder au maximum des épaisseurs de 2 fois 4 *mm*, elles réalisent jusqu'à 600 points ou 12 mètres de soudure continue à la minute.

LES DIVERS PROCÉDÉS DU SOUDAGE A MOLETTES

1° **Le soudage par points :** les molettes, dont la pression entre elles est maintenue constante, entraînent les pièces à souder. Le courant est lancé puis interrompu à une cadence régulière. Le rapport du temps de soudage au temps de repos est appelé **modulation.** L'intervalle entre points est constant (fig. 31 et 32).

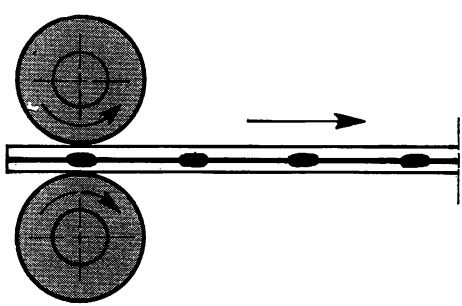


Fig. 31
Soudure à points espacés.

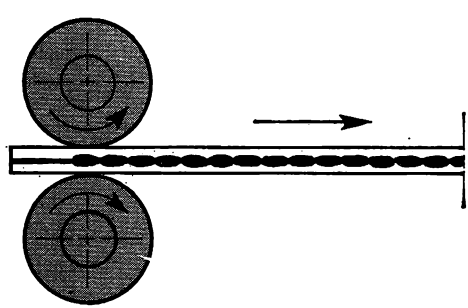


Fig. 32
Soudure à points jointifs.

2° **Le soudage continu,** c'est le procédé le plus utilisé. Le chevauchement des points de soudure est obtenu par un réglage de la fréquence des impulsions et de la vitesse de rotation des molettes (fig. 33 et 34).

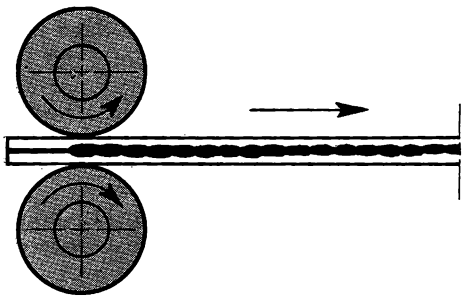


Fig. 33
Soudure continue étanche à points superposés.

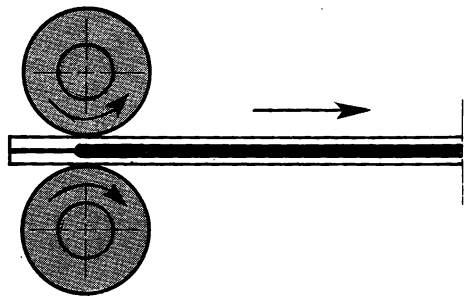
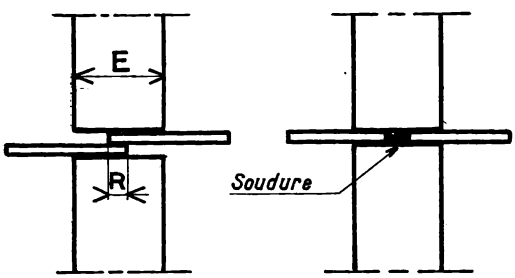


Fig. 34
Soudure étanche sans interruption du courant.

3° **Le soudage par points structuraux** est appliqué aux alliages légers et aux métaux réfractaires afin d'éviter retassures et tensions en faisant subir au point un traitement thermique et mécanique. Après chaque point de soudure, les molettes s'arrêtent cependant que la pression augmente, cela jusqu'à 600 fois à la minute (machines Sciaky).

4° **Le soudage à molette et mandrin :** l'une des molettes (commandée ou folle) est remplacée par un mandrin.



Avant soudage — Après soudage

Fig. 35

R = 0,8 à 1,5 e
E = 8 à 10 e
Pression de soudage: 1,5 à 3 fois la pression normale.
Intensité: 1,5 l'intensité normale.
Vitesse: moitié de la vitesse normale.
Métaux : acier doux, acier inoxydable, laiton.

5° **Le soudage par écrasement,** réalisé généralement entre mandrin et molette, s'obtient en faisant passer sous la molette les extrémités des deux tôles superposées avec un faible recouvrement (0,8 à 1,5 *e*). La pression de soudage étant élevée, il y a écrasement du joint, qui, généralement, ne présente aucune surépaisseur (fig. 35). Ce procédé peut remplacer le soudage en bout par étincelage pour l'assemblage de tôles minces de grandes longueurs.

6° **Le soudage avec électrodes continues en fil de cuivre.** Les molettes, montées sur une *machine classique*, présentent une gorge demi-circulaire dans laquelle défile un fil de cuivre recuit ou de laiton (fig. 36). Ces fils constituent ainsi des électrodes continuellement neuves et exemptes de souillures.

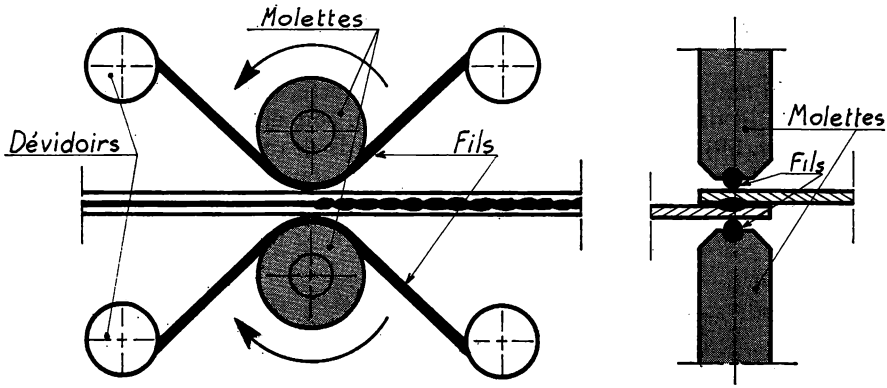


Fig. 36
Soudage avec électrodes continues en fil de cuivre.

Ce procédé permet de réaliser sans difficulté le soudage continu des tôles *zinguées*, *plombées* ou *étamées*. En soudage classique à la molette, le zinc, le plomb et l'étain mouillant facilement le cuivre encrassent les molettes qu'il est nécessaire de réusiner fréquemment.

La consommation du fil est égale au double de la longueur de soudure effectuée. Ce fil est récupérable pour d'autres utilisations.

7° **Soudage avec métal d'apport.** L'apport de métal se fait sous forme de *bandes* ou de *fils* de sections diverses, sur des *machines spécialement conçues* ; les électrodes étant soit deux molettes, soit un mandrin et une molette.

1° En amont de chaque molette, un dispositif déroule sur chaque face du joint un feuillard de faible épaisseur de même nature que les tôles à souder (fig. 37).

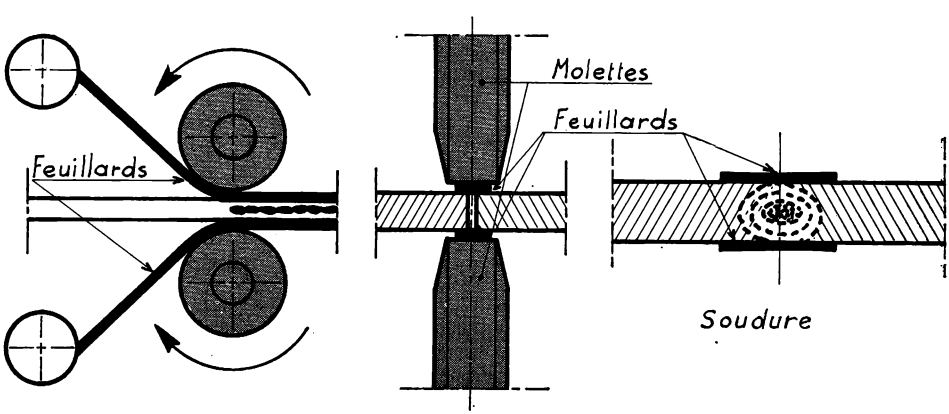


Fig. 37

REMARQUE. — Les deux feuillards ne constituent pas, à proprement dire, le métal d'apport, ils jouent le rôle d'une lingotière continue à l'intérieur de laquelle fondent les deux bords de tôle à assembler.

2° En employant un mandrin et une molette, le métal d'apport est, soit un fil de section triangulaire (fig. 38), soit un fil de section circulaire (fig. 39). Dans le premier cas, les bords des tôles à souder ne présentent aucune préparation particulière. Dans le second cas, les bords doivent être chanfreinés.

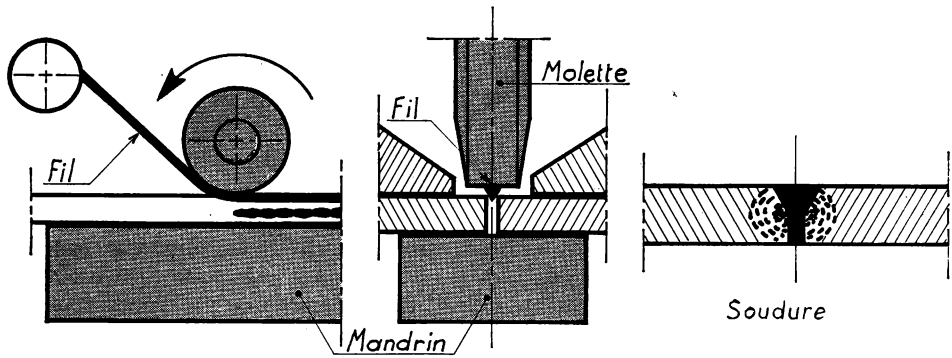


Fig. 38

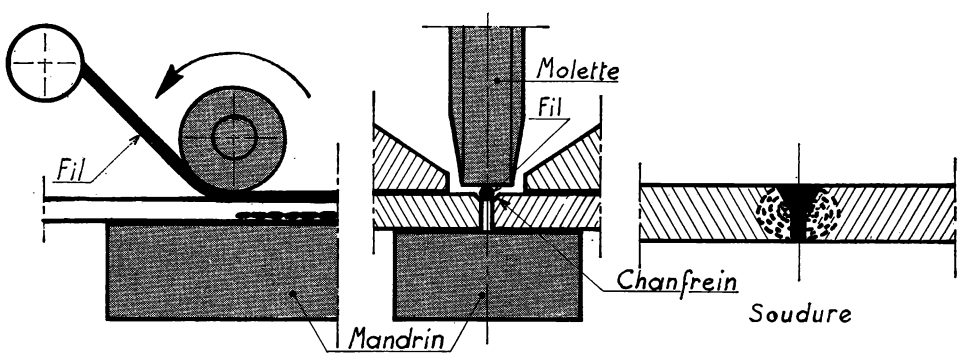


Fig. 39

LES POSTES A PINCES A MOLETTES

L'organisation générale d'un poste à pinces à molettes est semblable à celle d'un poste à pinces à électrodes cylindriques (pince, poste, armoire de commande, câbles de liaison).

Ce sont des machines de haute productivité, très employées en construction automobile.

Les pinces à molettes sont aussi maniables que les pinces à électrodes cylindriques.

PRÉPARATION DES SURFACES A SOUDER

On utilise normalement des tôles d'acier décapées ; les surfaces doivent être exemptes de graisse, de calamine ou de rouille.

Les métaux et alliages légers sont soigneusement dégraissés, décapés, rincés et séchés.

Soudage en bout par résistance

PRINCIPE

Les pièces à souder sont maintenues bout à bout par des mâchoires qui constituent les électrodes. Après échauffement par effet Joule, une pression est exercée par déplacement d'une des mâchoires, il y a soudage par interpénétration granulaire.

LE SOUDAGE EN BOUT PAR RÉSISTANCE EST RÉALISÉ SUIVANT DEUX MÉTHODES QUI SE DIFFÉRENCIENT PAR LE PROCÉDÉ DE CHAUFFAGE

1° **Soudage en bout par résistance pure :** les deux pièces, dont les surfaces de contact sont ajustées et exemptes de graisse, d'oxyde ou de tout corps étranger, sont maintenues fortement l'une contre l'autre pour assurer un contact constant (fig. 40). Le refoulement de la partie rendue pâteuse provoque la formation d'un bourrelet qui renferme les inclusions gazeuses et solides (fig. 9, chapitre I).

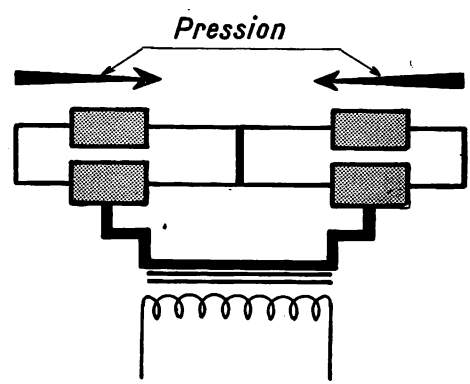


Fig. 40
Principe du soudage en bout.

2° **Soudage en bout par étincelage** subdivisé lui-même en soudage par étincelage direct et soudage avec préchauffage.

A) **Soudage par étincelage direct.** Il met en jeu une puissance relativement importante, de l'ordre de 0,1 à 0,2 kVA par mm^2 pour l'acier doux et un temps de soudage court (2 à 20 secondes).

*a) **période d'étincelage:*** le courant est d'abord établi, puis les pièces sont rapprochées lentement de façon à obtenir un *contact imparfait de leurs extrémités*. Le courant se concentre dans les aspérités en contact qui chauffent et sont volatilisées presque instantanément. On continue à rapprocher les pièces de façon à mettre successivement en contact de nouvelles aspérités qui sont fondues à leur tour et *expulsées sous forme d'une gerbe d'étincelles* (fig. 41).

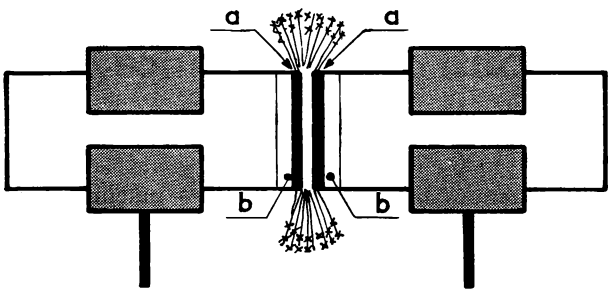


Fig. 41

Principe du soudage en bout par étincelage.

a = métal surchauffé éliminé par les arcs puis par le refoulement.

b = métal qui constituera la soudure.

Les contacts augmentent sans cesse et s'étendent rapidement à toute la surface du joint qui se recouvre d'une pellicule de métal fondu. Celui-ci échauffe progressivement les deux extrémités des pièces sur une profondeur maximale de 10 *mm* sur chaque pièce (en soudage par résistance pure les parties chauffées peuvent atteindre la totalité du métal placé entre les électrodes).

Afin de compenser la perte de métal par combustion et pour que la gerbe d'étincelles soit de plus en plus fournie, les pièces sont rapprochées à une vitesse accélérée.

Cette période d'étincelage a pour effets:

— *le chauffage des extrémités des pièces à souder.*

— *le dressage des surfaces constituant le joint.* Ces surfaces n'ont pas besoin d'être dressées parfaitement comme pour le soudage par résistance pure puisque les aspérités disparaissent progressivement sous forme d'étincelles.

— *la création d'un milieu non oxydant* pour le forgeage, provoquée par la vaporisation du métal pendant l'étincelage et le dégagement de gaz neutres qui empêchent les rentrées d'air.

*b) **refoulement:*** immédiatement après l'étincelage, le métal est soumis à un *refoulement rapide sous une forte pression*, courant coupé. Le refoulement provoque, d'une part : le *soudage des pièces par forgeage* et, d'autre part: *l'expulsion à l'extérieur du joint de la pellicule de métal fondu pouvant contenir des impuretés et des parties oxydées.* Ces impuretés et scories se retrouvent dans un bourrelet de forme irrégulière, présentant deux lèvres crevassées, facilement détachable au marteau.

B) **Soudage avec préchauffage.** Il permet de souder avec une puissance beaucoup moindre qu'en étincelage direct (0,03 à 0,05 kVA par mm^2). Ceci parce que la phase d'étincelage continue débute lorsque le métal est porté au rouge et nécessite donc une quantité de chaleur pour la fusion et la volatilisation des aspérités de contact presque trois fois moindre.

Le préchauffage diminue la perte de métal pendant la période d'étincelage.

La pression de refoulement qui est de 5 à 7 $da\ N/mm^2$ sur acier doux en étincelage direct peut être réduite à 2,5 à 4 $da\ N/mm^2$ lorsqu'il y a préchauffage puisque la zone chauffée est plus importante.

Par contre, le temps de soudage est plus long avec préchauffage que sans préchauffage.

Pratique du préchauffage. Si les pièces s'ajustent relativement bien, elles sont mises en contact pendant un temps court (chauffage par effet Joule). Si les sections à souder présentent un contact imparfait, les pièces sont animées d'un mouvement d'approche et d'éloignement qui crée des arcs électriques.

C'est le mode opératoire dit *par approches et reculs successifs du chariot.*

Le préchauffage est suivi d'une phase continue d'étincelage avant le refoulement final.

Les aciers riches en carbone et la plupart des aciers alliés ont tendance à tremper au voisinage de la soudure, surtout en soudage par étincelage direct puisque le gradient de température est plus élevé qu'en soudage avec préchauffage.

Un traitement thermique est souvent nécessaire, il s'effectue généralement sur la machine de soudage.

Pour les alliages légers, le préchauffage est supprimé et l'étincelage réduit à un temps court.

Le soudage électrique en bout par résistance est très employé, car il permet les assemblages de tôles minces (construction automobile), de tubes, de pièces de nature ou de section différentes sans préparation spéciale des extrémités des pièces.

L'étincelage et le refoulement provoquent un raccourcissement des pièces qui varie avec la nature du métal, la forme de la section à souder et le réglage des différentes fonctions du cycle de soudage.

LES MACHINES A SOUDER EN BOUT OU PAR ÉTINCELAGE

sont aussi précises et complexes que les machines à souder par points. Elles présentent une grande variété de modèles, depuis les petites machines utilisées pour le soudage des fils (commande manuelle de refoulement par leviers) jusqu'aux machines soudant les rails (12 000 mm^2 de section) ou les machines soudant les tôles sur deux mètres de largeur, ou les ronds de 140 *mm* de diamètre.

La partie électrique essentielle d'une machine à souder en bout est un transformateur, abaisseur de tension, capable de débiter une intensité très importante variant de 3 000 à 60 000 ampères et plus, suivant l'importance des machines. La tension, très faible, est de l'ordre de 2 à 15 volts.

La partie mécanique se compose essentiellement de deux étaux dont l'un est monté sur un chariot commandé par un système mécanique qui assure le déplacement et le refoulement des pièces à souder.

Au moins l'une des mâchoires de chaque étau est en métal bon conducteur de l'électricité (cuivre ou alliage de cuivre).

Ces mâchoires sont reliées au circuit secondaire, à une seule spire, du transformateur.

Dans beaucoup de modèles, le soudage peut être complètement automatique: la commande est obtenue mécaniquement par cames ou par pression hydraulique.

CHAPITRE XII

LE SOUDAGE PAR FRICTION

Il permet d'assembler par soudage deux, parfois trois pièces dont l'une, au moins, est de révolution, de même nature ou de nature différente (acier dur et acier doux, cuivre et alliages, aluminium et alliages, acier et cuivre, etc.).

PRINCIPE

La pièce de révolution est animée d'un mouvement de rotation, fixe ou variable (1 000 à 4 800 *tr/mn*) suivant son axe longitudinal; elle prend appui sur la pièce fixe.

Lorsque la quantité de chaleur, produite par le frottement, est suffisante pour porter les pièces à la température de soudage, on arrête brusquement le mouvement de rotation et on exerce une poussée dans le sens axial. Cette poussée provoque le soudage par *interpénétration granulaire.*

Le refoulement, consécutif à la poussée axiale, expulse les parties du métal oxydées par l'action de l'air en formant un bourrelet.

Principales dispositions du soudage par friction :

1° Rotation d'une pièce s'appuyant sur l'autre pièce fixe (fig. 1);

2° Rotation des deux pièces mises en pression, tournant en sens contraire l'une de l'autre (fig. 2);

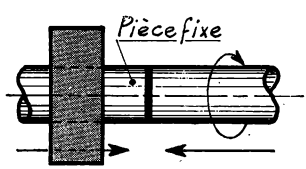


Fig. 1

Fig. 2

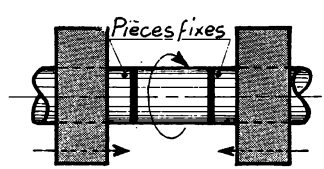


Fig. 3

3° Rotation d'une pièce s'appuyant de part et d'autre de deux autres pièces fixes (fig. 3).

Les figures 4 à 8 montrent différentes soudures obtenues par friction.

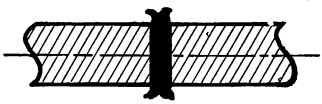


Fig. 4
Soudure en bout de 2 ronds.

Fig. 5
Soudure en bout de 2 tubes.

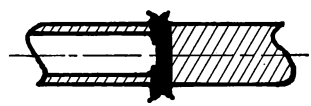


Fig. 6
Soudure en bout d'un tube et d'un rond.

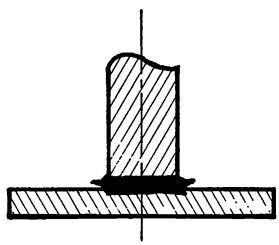


Fig. 7
Soudure en bout d'un rond sur un flasque plan.

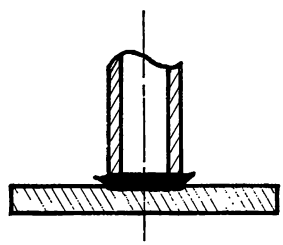


Fig. 8
Soudure en bout d'un tube sur un flasque plan.

MACHINES A SOUDER PAR FRICTION

Elles comportent essentiellement :

a) Deux organes. L'un assure la *rotation d'une pièce de révolution*, serrée dans les mors d'un mandrin. L'autre commande la *translation d'une seconde pièce* également serrée dans les mors d'un mandrin, il assure ainsi la **friction** des deux pièces et le **refoulement** (fig. 9);

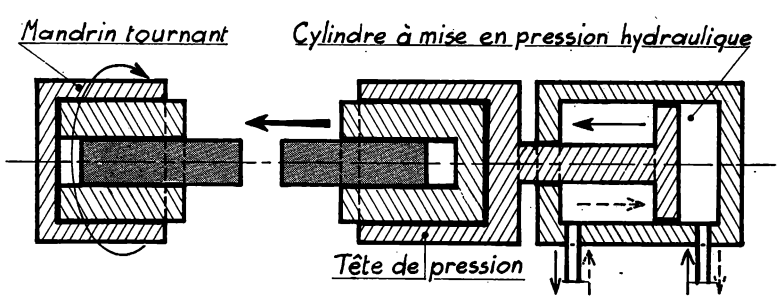


Fig. 9
Schéma de principe d'une machine à souder par friction.

b) Un banc monté sur un bâti rigide.

La source énergétique est un moteur électrique ou hydraulique à vitesse variable, accouplé à un embrayage et à un frein.

Les temps des différents termes de la séquence de soudage (entraînement de la pièce de révolution, poussée axiale, maintient de cette poussée, refoulement après arrêt de la pièce tournante) sont assurés par temporisateurs électroniques (machines Sciaky).

Le serrage des mors, le refoulement, la commande de l'embrayage et du freinage sont assurés par commande pneumatique ou hydraulique.

Le tableau suivant donne les réglages pour le soudage de ronds de $\varnothing = 20$ *mm* en utilisant des vitesses de rotation de 2 000 à 4 000 *tr/mn.*

Métaux ou alliages	Pression unitaire en *da N/mm²*		Effort maximal *da N*	Temps total *secondes*
	Echauffement	Refoulement		
Acier doux	3,5 à 6	6 à 10	3 150	4
Acier inoxydable ...	8 à 12	10 à 14	4 400	4 à 8
Alliages légers	0,5 à 3	3 à 6	1 900	4
Cuivre	2 à 4	2 à 6	1 900	12

NOTA — L'effort maximal est égal au produit de la pression unitaire par la section (315 *mm²*).

APPLICATIONS DU SOUDAGE PAR FRICTION

Soudage de ronds en acier de différentes nuances ou autres métaux, soudage de ronds sur carrés, de ronds sur pastilles ou plaques, de queues de soupapes, d'arbres de transmission. Soudage de tubes sur tubes ou sur plaques. Réalisation de forets, tarauds, fraises en associant l'acier rapide à l'acier mi-dur, etc.

Actuellement les machines à souder par friction peuvent souder des ronds de $\varnothing$ 80 *mm* avec une pression de refoulement de 40×10^4 *N* et des ronds de $\varnothing$ 92 *mm* ou des tubes de $\varnothing$ 178 *mm* avec une pression de refoulement de 100×10^4 *N*.

En raison de ses avantages : aucune préparation des joints, peu de défauts de soudure, bonne ténacité, grande rapidité d'exécution, main-d'œuvre réduite et peu qualifiée, le soudage par friction tend à se développer en zone désertique pour le soudage des pipelines.

Employé couramment pour le soudage de tubes de faible diamètre, on envisage la construction d'une machine capable de souder des tubes de 0,90 *m* de diamètre. Pour exécuter ce travail, l'effort de soudage requis serait de l'ordre de 500 000 *da N*, la vitesse de rotation du tube étant comprise entre 30 et 60 *tr/mn;* ceci nécessitera le développement d'une puissance de plus de 1100 *kW*.

L'exécution de la soudure ne demandera que 20 à 30 secondes avec production d'une soudure toutes les 10 minutes.

CHAPITRE XIII

CONTROLE ET ESSAIS DES SOUDURES

Les méthodes de contrôle des soudures peuvent être groupées en trois catégories.

Essais destructifs

Ils entraînent la destruction totale de quelques échantillons prélevés dans un lot de pièces identiques. Par exemple, petits réservoirs soumis à un gonflement hydraulique jusqu'à éclatement ; celui-ci doit se produire ailleurs que sur la soudure.

Prélèvements de portions de soudure qui seront soumises à des essais mécaniques: traction, fragilité, dureté, fatigue, pliage ; ou à des examens micrographiques ou macrographiques.

Essais semi-destructifs

Ils s'exercent sur des échantillons prélevés dans le joint soudé sans entraîner sa destruction, en laissant la possibilité de le reformer. Trois méthodes sont employées.

MÉTHODE SCHMUCKLER

qui consiste à effectuer, au moyen d'une fraise, une saignée dans la soudure. Un réactif approprié versé dans la saignée fait apparaître les défauts tels que soufflure, fissure, collage, manque de pénétration, inclusion de laitier.

PRÉLÈVEMENTS DE PETITES PORTIONS DE SOUDURE DANS LESQUELLES SERONT TIRÉES DES MICRO-ÉPROUVETTES

(longueur 7,5 *mm*, diamètre 1,5 *mm*) soumises à des essais de laboratoire (micro-machine Chévenard) qui donneront les caractéristiques mécaniques.

PRÉLÈVEMENTS DE MÉTAL ET DÉTERMINATION DE SA DENSITÉ

celle-ci varie avec la présence de laitier, de soufflures ou de porosités, même microscopiques.

Essais non destructifs

Ce sont les plus employés, cependant aucun d'eux n'est parfait: chacun décèle facilement un défaut, mal un autre ; certains (radiographie, gammagraphie par exemple) demandent une certaine expérience pour interpréter les résultats obtenus.

Parmi les principales méthodes de contrôle, citons :

Contrôle visuel

EXAMEN DE L'ASPECT DE LA SOUDURE

effectué sans ou avec appareils d'optique ; il ne permet de contrôler que certains aspects (dimensions, dénivellations, manque de pénétration, etc). Une soudure située dans une région inaccessible peut être explorée à l'aide d'un ***endoscope*** qui l'éclaire et renvoie son image dans un oculaire ou une chambre photographique.

CONTRÔLE PAR FLUORESCENCE

utile pour la recherche des défauts superficiels, souvent difficiles à déceler par radiographie ou magnétoscopie, tels que fissures microscopiques très dangereuses sur pièces soumises à de grands efforts de fatigue ou à des vibrations nombreuses.

Principe : les soudures sont enduites d'un liquide dont le *ressuage*, après essuyage de la surface, est rendu apparent au droit des défauts en lumière ultraviolette par la présence d'une matière fluorescente au sein du liquide.

Pratique de l'essai :

1° nettoyage de la pièce ;

2° badigeonnage de la soudure au pinceau avec un liquide détecteur (huile minérale additionnée d'un produit énergiquement luminescent en *lumière de Wood* (1) ;

3° enlevage de l'excès de liquide ;

4° dépôt sur la surface d'une mince couche de poudre renforçatrice destinée à accentuer la visibilité du ressuage ;

5° examen en lumière noire, soit dans l'obscurité, soit dans l'ombre. Les criques apparaissent en jaune sur fond violet.

Contrôle mécanique

Les pièces sont soumises à des pressions supérieures à celles qu'elles subiront en fonctionnement.

Les essais d'étanchéité sont soit *pneumatiques*: les fuites sont décelées en plongeant la pièce dans l'eau ou en enduisant les soudures d'eau de savon ; soit *hydrauliques.*

Contrôle physique

CONTRÔLE PAR CONDUCTIBILITÉ ÉLECTRIQUE

basé sur la variation de conductibilité électrique produite par un défaut. Ce procédé, qui manque de sensibilité, est peu employé.

CONTRÔLE MAGNÉTO-ACOUSTIQUE

une bobine d'induction est déplacée sur la soudure située dans un champ magnétique. L'irrégularité causée dans le champ magnétique par un défaut donne naissance dans la bobine d'induction à une force électro-motrice qui, après passage dans un amplificateur, produit un son dans un écouteur.

CONTRÔLE PAR MAGNÉTISME

la pièce (acier exclusivement) est placée dans un circuit magnétique. Les lignes de force sont matérialisées par des substances ferro-magnétiques disposées sur la soudure soit par pulvérisation d'oxyde de fer soit par aspersion d'une suspension de fer ou d'un corps ferro-magnétique dans du pétrole.

Tout défaut qui entraîne une variation de perméabilité magnétique de la soudure est révélé par une tache bien localisée dans l'image matérielle du circuit magnétique.

Cette méthode, dont la sensibilité est liée au degré de poli des surfaces, est plutôt employée pour le contrôle d'éprouvettes usinées de faibles dimensions que pour le contrôle des pièces entières.

(1) Lumière de Wood ou lumière noire : radiations ultra-violettes qui excitent la fluorescence de certaines substances.

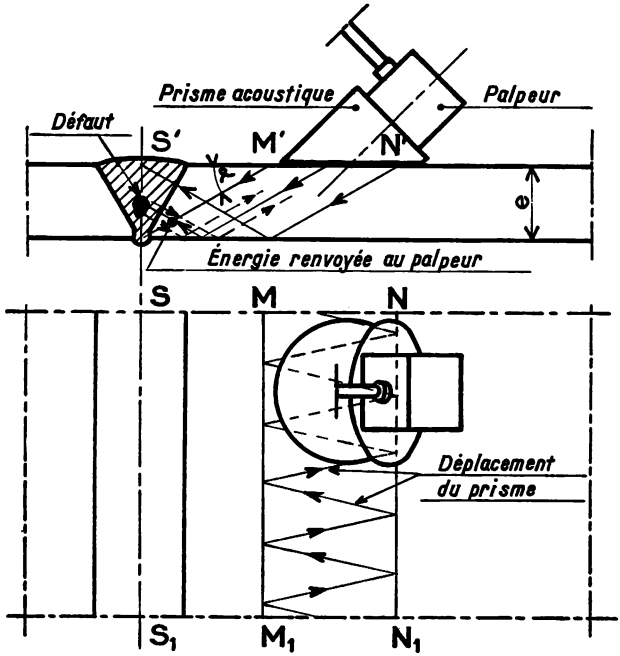


Fig. 1

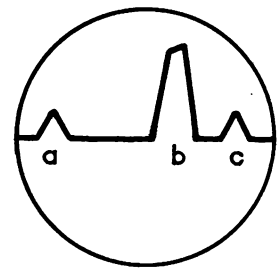


Fig. 2

Image transmise sur l'écran du tube cathodique.

Les points a et c représentent les réflexions des ondes ultra-sonores sur les faces F1 et F2, la courbe b représente la réflexion des ondes sur le défaut. Les distances ab et bc, proportionnelles aux distances parcourues par l'onde ultra-sonore, permettent de localiser le défaut en profondeur.

Pour que l'axe du faisceau balaie toute la hauteur de la soudure, il faut déplacer le centre du palpeur entre M et N de façon que l'on ait $MN = \frac{e}{tg\alpha}$

De même, M est à une distance de l'axe S de la soudure telle que $SM = MN = \frac{e}{tg\alpha}$. L'appareil est construit de telle façon que $\alpha = 30^o$, d'où $SM = MN = \frac{e}{0{,}577} = 1{,}74\ e$.

Un appareil émet des vibrations ultra-sonores à haute fréquence (un million de hertz (1) environ) et de faible puissance. Ces vibrations sont envoyées sur la soudure à étudier, puis analysées à l'aide d'un oscillographe cathodique. La faible épaisseur des tôles et les stries du cordon de soudure ne permettant pas de sonder perpendiculairement à la surface, le faisceau de vibrations est envoyé obliquement sur la soudure (fig. 1).

Lorsque la soudure présente un défaut, l'image cathodique permet de le situer et d'en connaître la profondeur (fig. 2).

Certains appareils récents font apparaître sur l'écran, sous forme de taches, les points où le parcours d'ultrasons rencontre ces défauts. On obtient ainsi une image donnant la position et la forme des défauts que comporte la soudure ou la pièce.

NOTA. — Les ultrasons sont très employés pour le contrôle des assemblages collés (construction aéronautique). Ils le sont également pour contrôler la qualité des métaux avant leur emploi et pour mesurer l'épaisseur des matériaux en cours d'usinage.

(1) Le *hertz* est l'unité de fréquence. C'est la fréquence d'un phénomène périodique dont la période est 1 seconde.

Les contrôles par ultrasons sont très délicats à conduire et à interpréter correctement, mais ils sont d'une efficacité presque absolue. Leur avantage réside dans le fait que l'auscultation est pratiquée à partir d'une seule face de l'assemblage, que la seconde face soit ou non accessible. De plus, ils ne présentent aucun danger pour le personnel.

CONTRÔLE PAR RADIOGRAPHIE AUX RAYONS X

Les rayons X constituent le prolongement naturel du côté des très courtes longueurs d'ondes (ultra-violet) de la gamme continue des ondes. Ils prennent naissance sur l'électrode positive (anode) sous le choc d'un faisceau d'électrons rapides issus d'une électrode négative (cathode).

Le tube à rayons X actuel se présente sous l'aspect d'un cylindre de verre dans lequel règne un vide très poussé. Aux extrémités du tube sont scellées les deux électrodes entre lesquelles est appliquée une grande différence de potentiel (50 à 300 KV) qui a pour effet d'accélérer les électrons. Le rayonnement X issu de l'anode sort du tube en franchissant une ouverture particulièrement perméable nommée *fenêtre*.

Les films, interposés entre leurs écrans renforçateurs au plomb (fig. 3) sont enfermés dans des cassettes souples, généralement en matière plastique opaque, qui épousent la forme de la pièce à examiner. Les cassettes placées les unes au bout des autres sont maintenues en place par des moyens appropriés (cales, courroies, etc.). Pour déterminer la position du film par rapport à la pièce on interpose entre les deux des repères (chiffres ou lettres) en plomb qui apparaîtront en clair sur le film.

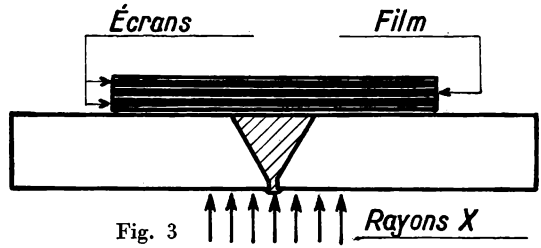


Fig. 3

Les écrans sont en plomb laminé et poli, l'écran côté source a une épaisseur de 0,07 mm, l'écran extérieur a une épaisseur de 0,5 mm.

Comme l'absorption du rayonnement est fonction de l'épaisseur de métal traversé, les défauts apparaissent sous l'aspect de zones plus sombres car on se contente généralement de clichés négatifs.

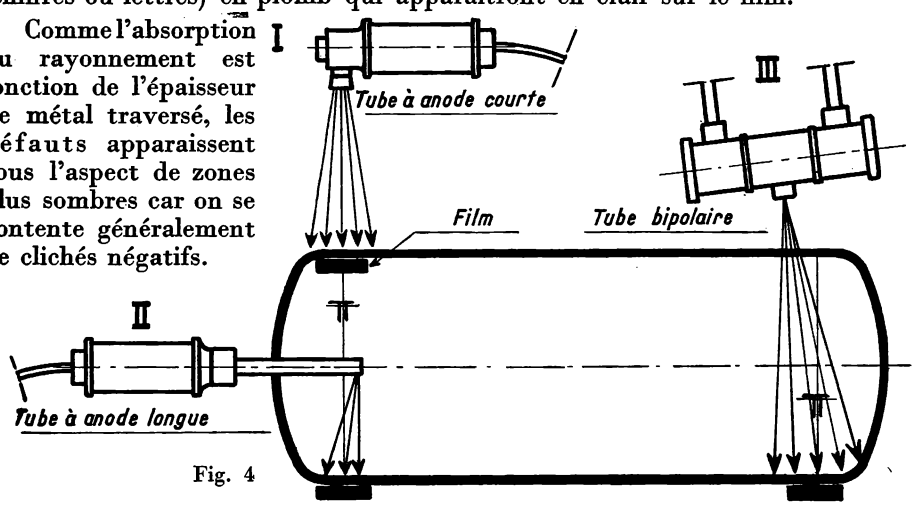


Fig. 4

Les radiographies des soudures de corps cylindriques se font suivant trois dispositions principales de pénétration des rayons X (fig. 4): extérieur vers intérieur (I), intérieur vers extérieur (II) et par double traversée (III).

Protection contre les rayons X et la haute tension. — Les hautes tensions employées pour l'alimentation des tubes à rayons X sont très dangereuses ; les câbles sont parfaitement isolés par des enveloppes dont l'extérieur métallique est mis à la terre. Le tube est enfermé dans une enveloppe métallique spéciale appelée gaine qui assure toutes les protections.

CONTRÔLE PAR RADIOGRAPHIE AUX RAYONS γ OU GAMMAGRAPHIE

Le contrôle radiographique de grands ensembles sur chantiers est pénible et dangereux aux rayons *X*, dont la capacité de pénétration dans l'acier est de 150 *mm*. Il est rendu facile en utilisant des sources radioactives qui émettent des rayons γ.

Les sources radioactives sont constituées par des *sels de radium* (capacité de pénétration dans l'acier : 200 *mm*) mais, leur prix étant extrêmement élevé, on emploie plus couramment des sources radioactives artificielles en *cobalt 60*, d'une capacité de pénétration dans l'acier de 240 *mm* d'épaisseur pour une source de 1 000 curies (1). (Actuellement certains blocs contrôle-radio peuvent recevoir des sources de 2 000 *curies*.)

On emploie également des sources radioactives artificielles en *tantale 182* dont la capacité de pénétration dans l'acier est, comme pour les rayons *X*, 150 *mm*.

L'installation productrice de rayon γ est plus simple, moins volumineuse, plus légère que celle des rayons *X*, mais la diminution de puissance des sources avec le temps exige des réactivations dans les centres atomiques, sauf pour le radium dont la période (2) est de 1590 ans.

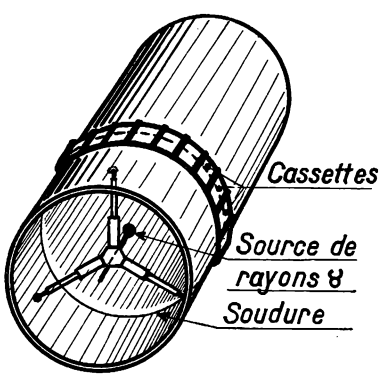


Fig. 5

Par contre, le temps de pose est plus court par l'emploi de rayons *X* que par celui des rayons γ.

Les soudures sur pièces circulaires se prêtent particulièrement bien au contrôle gammagraphique (fig. 5). La source est placée au centre, l'opération s'exécute en une seule fois tandis qu'avec les rayons *X* plusieurs poses seraient nécessaires.

(1) Le curie est l'activité nucléaire d'une quantité de radioélément pour laquelle le nombre de désintégrations par seconde est $3{,}7 \times 10^{10}$.

La masse de radium dont l'activité nucléaire est 1 curie est très voisine de 1 gramme.

(2) La période est le temps durant lequel une matière radioactive perd la moitié de sa puissance 5 ans 3 mois pour le cobalt 60, 111 jours pour le tantale 182.

Notes sur le cobalt et le tantale

Le cobalt (symbole *Co*, masse atomique : 58,933) est un métal blanc, malléable et ductile de densité 8,9. Il fond à 1 495 °C et bout vers 2 900 °C. Il est inaltérable à la température ordinaire et moins oxydable que le nickel à haute température. L'acide nitrique seul le dissout avec facilité.

Le colbatage consiste en une application de cobalt sur d'autres métaux par voie électrolytique pour les préserver de l'oxydation. Ces dépôts, susceptibles d'un beau brillant, sont plus durs et plus résistants que ceux de nickel.

Le cobalt 60 est un *isotope* (1) artificiel de masse atomique 60.

Le tantale (symbole *Ta*, masse atomique : 180,948) est un métal blanc, brillant de densité 16,7 qui fond à 2 900 °C et bout vers 6 000 °C, il est donc très réfractaire. Il est dur, tenace, malléable et ductile à froid, très élastique et présente une excellente résistance à la corrosion. Il n'est attaqué que par l'acide fluorhydrique, les alcalis et les nitrates alcalins fondus.

Le tantale présente beaucoup d'analogies avec le ***niobium*** (symbole *Nb*) ; ses propriétés chimiques sont assez proches de celles du ***vanadium*** (symbole *V*).

Protection du personnel en contact avec des éléments radioactifs. — Le personnel doit utiliser des gants et des tabliers en caoutchouc au plomb, ainsi que des lunettes en verre au plomb ; il doit porter une « chambre d'ionisation » graduée qui permet de relever, chaque jour, la radioactivité absorbée. De plus, les opérateurs doivent être régulièrement soumis à un examen biologique du sang.

L'utilisation de rayons puissants conduit à les manipuler à l'abri de protections fixes et totales. A cet effet, les pièces à contrôler sont introduites dans des « ***blocs de contrôle radio*** » dont les murs très épais (1,20 *m* par exemple) sont construits en béton. Les portes d'entrée et de sortie sont blindées d'épaisses plaques de plomb.

L'examen aux rayons X et la gammagraphie constituent actuellement le meilleur contrôle non destructif des soudures.

Ces deux procédés permettent à un spécialiste d'apprécier facilement les défauts tels que soufflures, fissures, inclusions de laitier, manque de pénétration.

Contrôles très coûteux, ils sont réservés aux pièces soumises à des efforts importants.

---

(1) Les *isotopes* sont des éléments qui ont des charges atomiques et des propriétés chimiques identiques tout en ayant une masse atomique différente.

CHAPITRE XIV

LE SOUDO-BRASAGE

PRINCIPE

Le soudo-brasage est un soudage hétérogène qui a été défini au chapitre « *assemblages, généralités* ». Rappelons qu'il se distingue du brasage par certaines particularités et que, notamment, il nécessite l'emploi d'un chalumeau (oxyacétylénique, oxhydrique, oxypropane). On utilise généralement le chalumeau oxyacétylénique.

L'alliage constituant la soudo-brasure est déposé à l'état liquide sur les parois des pièces à assembler. Celles-ci restent solides et ne sont jamais portées à la température de fusion de la soudo-brasure.

POUR RÉALISER UN ASSEMBLAGE RÉSISTANT, IL FAUT QU'IL Y AIT ACCROCHAGE

de la soudure avec le métal de base, c'est-à-dire, *interpénétration moléculaire* dans les couches superficielles des surfaces en contact.

L'accrochage (phénomène interne) n'est possible que si la soudo-brasure s'étend rapidement sur la surface du métal ; cet étalement prend le nom de ***mouillage*** (phénomène superficiel) (fig. 1 et 2).

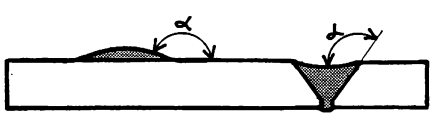


Fig. 1

Mouillage $\alpha > 90°$. Le métal s'étale.

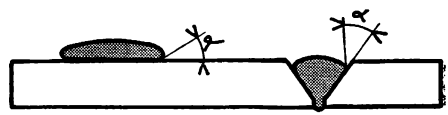


Fig. 2

Collage $\alpha < 90°$. Le métal se contracte, forme boule.

LE MOUILLAGE

Il dépend de la composition chimique de la soudo-brasure, de celle du métal à souder, de l'état des surfaces et de leur température.

Des micrographies du joint montrent que le mouillage n'entraîne pas d'interpénétration acier-brasure supérieure au micron.

Soudo-brasage des métaux ferreux

Emplois.

1° Assemblage d'aciers ayant une mauvaise soudabilité par fusion.

2° Assemblage de métaux ou alliages de nature différente.

3° Si l'on ne recherche pas une résistance mécanique élevée, assemblage d'aciers doux:

a) d'épaisseurs différentes (facilité, gain de temps);

b) assemblage à clin (peu pratiqué en soudage oxyacétylénique), notamment assemblage de tubes;

c) pour éviter les déformations importantes provoquées par le soudage autogène.

4° Assemblage de tôles galvanisées ou étamées.

5° Réparation des pièces de fonte grise. Le soudo-brasage est plus aisé que le soudage par fusion: les inconvénients de la dilatation et du retrait étant moindres, le préchauffage est supprimé ou réduit (pièces très bridées).

6° Le soudo-brasage est le seul procédé applicable à la réparation de pièces en fonte malléable car le soudage par fusion altère cette fonte et rend le joint fragile.

Métaux d'apport.

Ce sont des alliages, genre *laiton* du 2e titre (soudo-brasure courante) ou *maillechort* (soudo-brasure à haute résistance), auxquels est ajouté une faible quantité de *silicium*. Celui-ci forme, en s'oxydant sur l'alliage fondu, une pellicule qui s'oppose à la volatilisation du zinc.

	Cuivre	Zinc	Nickel	Silicium	Température de fusion	Charge de rupture
Laiton	60 %	40 %		0,1 à 0,2%	880 à 890°	$R = 35$ daN/mm^2
Maillechort	50 %	40 %	10 %	0,2 %	930 à 950°	$R = 40$ à 42 daN/mm^2

Ces alliages sont livrés en baguettes de 2 à 8 *mm* de diamètre.

A partir de 4 *mm*, le diamètre de la baguette est égal aux 3/4 de l'épaisseur à soudo-braser.

Préparation des surfaces à soudo-braser.

Le métal doit être mis à nu sur toute la surface constituant le joint, soit mécaniquement, soit chimiquement.

Emploi de flux décapants.

Ils ont pour but, soit d'empêcher la formation d'oxyde sur la surface des pièces pendant le chauffage, soit de scorifier les oxydes qui pourraient se former pendant le soudage. Leur point de fusion est inférieur à celui du métal d'apport de 50 à 110 °C.

Le flux se présente sous forme *solide* (poudre) ou pâteuse ou *gazeuse*. Les poudres et les pâtes sont à base de borax (borate de soude) et d'acide borique.

NOTA. — On trouve dans le commerce des baguettes de brasure enrobées de flux solidifié.

Les meilleurs résultats sont obtenus par le procédé gasflux dans lequel le flux gazeux est introduit dans la flamme du chalumeau.

L'appareil gasflux, intercalé sur le circuit du gaz carburant, est constitué d'un saturateur dont tout le volume est rempli par une mèche sur laquelle le liquide s'évapore, et d'une cuve contenant une réserve de liquide volatil (1).

Le gaz carburant traverse le saturateur et en sort chargé d'une quantité de flux proportionnelle au débit du chalumeau dont la flamme devient verdâtre.

Les joints obtenus avec le procédé gasflux sont homogènes, sans soufflures ni occlusions, ils ne nécessitent aucun travail de finissage car il ne se produit aucun dépôt vitrifié semblable à celui qui résulte de l'emploi de flux solide.

SOUDO-BRASAGE DE L'ACIER DOUX

Température de mouillage : *limite inférieure* : 750°-800 °C, en deçà, il y a collage ; *limite supérieure* : 900°-920 °C, au-delà, il y a volatilisation du zinc qui contamine la surface.

Décapage : mécanique, de préférence par sablage.

Flux : gasflux ou 2/3 borax, 1/3 acide borique employé soit en poudre dans laquelle est trempée périodiquement la baguette chaude ; soit en pâte, obtenue par délayage dans l'eau et dont on enduit baguette et pièce.

Puissance du chalumeau oxyacétylénique : 50 à 60 litres/heure d'acétylène par *mm* d'épaisseur pour les assemblages bout à bout, et 75 à 80 *l/h* pour les assemblages en angle intérieur.

Pratique du soudo-brasage. — La méthode opératoire est semblable à celle du soudage oxyacétylénique à gauche mais le chalumeau est un peu plus incliné (30° au lieu de 45°). Le réglage du chalumeau, le pointage des pièces, l'exécution d'un talon sont les mêmes que pour la soudure à gauche.

(1) Composé essentiellement de borates dissous dans l'alcool éthylique, méthylique ou butylique.

On adopte la méthode demi-montante à partir d'une épaisseur de 4 *mm*.

Le soudo-brasage s'exécute en une passe jusqu'à 7 *mm*, en deux passes de 8 à 15 *mm* d'épaisseur.

La préparation des joints est indiquée figure 3 et 4.

La figure 5 représente une soudo-brasure bien exécutée qui doit donner une résistance d'accrochage à la rupture par traction égale à 25 *da N/mm²* avec le laiton et 35 *da N/mm²* avec le maillechort.

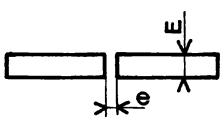


Fig. 3

$e = \frac{E}{2}$

Jusqu'à E = 4 mm

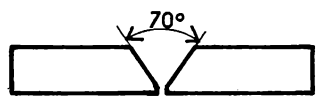


Fig. 4

A partir de 5 mm

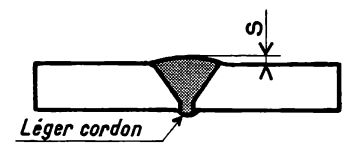


Fig. 5

Surépaisseur S = 15 % E

SOUDO-BRASAGE DE L'ACIER GALVANISÉ

Le soudo-brasage bien réalisé ne détruit pas la couche de zinc, aussi est-il souvent pratiqué pour l'assemblage de pièces galvanisées lorsqu'il s'agit d'ouvrages dont les dimensions dépassent celles des bains de galvanisation.

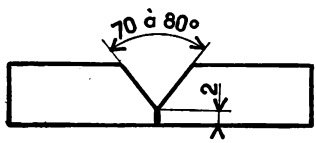


Fig. 6

Les bords, recouverts de zinc, ne sont pas décapés, leur écartement est plus faible que pour la tôle noire. A partir d'une épaisseur de 5 *mm* il convient d'adopter la préparation indiquée figure 6.

Le flux est le même que celui utilisé pour la tôle noire, la puissance du chalumeau est un peu réduite : 35 à 40 *l/h* par *mm* d'épaisseur.

Température de mouillage : 800 °C.

Sous l'action de la chaleur le zinc fond sans se volatiliser (*température d'ébullition* : 918 °C), il entre ainsi en solution avec l'alliage d'apport qui prend contact avec l'acier parfaitement décapé, le mouillage a lieu facilement.

SOUDO-BRASAGE DE L'ACIER ÉTAMÉ

Il est pratiqué rarement, sauf pour des réparations.

Le métal d'apport est du cuivre pur qui, additionné d'un peu d'étain provenant de la couche protectrice, donne un bronze présentant des caractéristiques mécaniques acceptables, ce qui n'est pas le cas avec le laiton de soudo-brasage.

Aucun décapage des bords. Même flux que pour la tôle noire.

LE SOUDO-BRASAGE N'EST PAS PRATIQUÉ SUR LES ACIERS INOXYDABLES

car la température de fusion des alliages d'apport est élevée et cause des fissures dangereuses dans le métal.

Ces aciers peuvent se braser en employant un alliage de cuivre, cadmium et argent ainsi qu'un flux spécial.

SOUDO-BRASAGE DES FONTES

Température de mouillage comprise entre 650 °C et 850 °C ; au-delà, le graphite donne naissance à des gaz qui empêchent le mouillage.

Décapage : de préférence par sablage ou grenaillage pour éliminer le graphite, afin d'obtenir un bon mouillage de la brasure. Éviter le meulage qui écrase le graphite sur les bords à assembler. Décaper les abords du joint sur une longueur au moins égale à l'épaisseur.

Flux : gasflux ou flux spécial, de préférence en pâte avec laquelle on enduit les bords à assembler.

Puissance du chalumeau : variable avec la forme des pièces, de l'ordre de 25 à 50 *l/h* par *mm* d'épaisseur.

Mode opératoire : la préparation des bords doit être soignée, les chanfreins se font en *V* ou en *X*. Il faut proscrire les arêtes vives qui s'échauffent trop rapidement, favorisent le collage et constituent des amorces de rupture. Le chalumeau est, comme pour le soudo-brasage de l'acier, incliné à 30°.

Sur bords chanfreinés en *V*, on opère en une seule passe jusqu'à 8 *mm* d'épaisseur, en 2 passes de 8 à 12 *mm* par tronçons de 80 à 100 *mm* de longueur, en 3 passes de 12 à 20 *mm*.

Le chanfrein est de 90° jusqu'à une épaisseur de 12 *mm* et de 80° pour les épaisseurs comprises entre 12 et 20 *mm*.

Au-dessus de 20 *mm* on opère en 4 passes (fig. 7), en faisant un chanfrein de 70°.

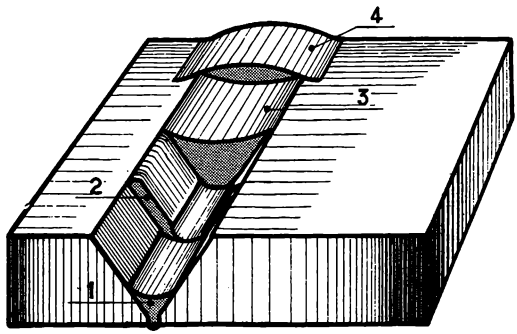


Fig. 7

1° exécution d'un cordon de quelques centimètres ;

2° dépôt de soudo-brasure sur chaque face du chanfrein, du bas vers le haut, en frottant la baguette sur la paroi à mouiller ;

3° remplissage du chanfrein par fusion intime avec le dépôt 2 ;

4° surcharge du joint en débordant largement de chaque côté du chanfrein.

Pour le soudo-brasage de pièces bridées ou complexes, il y a intérêt à commencer par un préchauffage local à 200-300 °C, et de procéder immédiatement après exécution de la soudure à un réchauffage d'égalisation pour réduire et équilibrer les tensions; le refroidissement doit se faire lentement en recouvrant la partie soudée de matelas isolants.

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE I

LES ASSEMBLAGES Page

Généralités 3

CHAPITRE II

LES ASSEMBLAGES DÉMONTABLES 13

Le boulonnage 13
Les boulons 13
Les clés à écrous 21
Les goujons 23
Les vis 23

CHAPITRE III

TARAUDAGE ET FILETAGE 25

Généralités 25
Le taraudage 26
Le filetage 31

CHAPITRE IV

L'AGRAFAGE 35

Ses applications 35
Agrafage longitudinal replié 36
Agrafage de fonds 39
Agrafage en angle 42
Agrafage transversal 43
Agrafe renvoyée à l'intérieur 44
Machine à serrer les agrafes 44
Exécution des bords tombés et des bords rétreints 45

CHAPITRE V

Page

LE RIVETAGE DES TOLES D'ACIER 49
Les rivets 49
Les rivures 52
Préparation du rivetage 53
La pratique du rivetage 58

CHAPITRE VI

LE SOUDAGE A L'ÉTAIN 74
Préparation des pièces à souder 77
Exécution de la soudure 81

CHAPITRE VII

LE SOUDAGE AU CHALUMEAU 83
Les flammes soudantes 83
La flamme oxyacétylénique 84
Les matières premières du soudage oxyacétylénique 84
L'oxygène 84
Le carbure de calcium 89
L'acétylène 89
Les générateurs d'acétylène 92
Les postes de soudage 99
Les soupapes de sûreté 100
Les détendeurs 102
Les chalumeaux soudeurs 105
Les économiseurs 108
Les tuyaux en caoutchouc 108
Mise en marche des postes..... 109
La pratique du soudage 112
Notions sur la dilatation et le retrait en soudage autogène 116
Les méthodes de soudage et la préparation des bords à souder 123
Les défauts des soudures 132

CHAPITRE VIII

LE SOUDAGE A L'ARC ÉLECTRIQUE 134
Les postes de soudage à l'arc électrique 135
Les électrodes métalliques 138
La pratique du soudage à l'arc électrique 143
Soudage avec électrodes couchées 155
Le soudage sous flux électro-conducteur 156
Soudage sous laitier électro-conducteur dit « électro-slag » 161
Le soudage électrique à l'hydrogène atomique 163
Le soudage électrique en atmosphère inerte 164
Le soudage à l'arc électrique sous atmosphère active d'anhydride carbonique 172
Contrôle du soudage automatique par télévision 175
Défauts des soudures à l'arc électrique..... 175
Soudage électrique des goujons au pistolet 177
Teintes conventionnelles des ogives des bouteilles à gaz comprimés et des tuyauteries transportant ces gaz..... 179

CHAPITRE IX

LE SOUDAGE « PLASMA» 180

Principe de formation du plasma d'arc 180
Mise en œuvre du procédé plasma 183

CHAPITRE X

LE SOUDAGE PAR BOMBARDEMENT ÉLECTRONIQUE 189

Principe du soudage 189
Données du soudage 190
Focalisation. Canon à électrons 191
Avantages et possibilités d'application du procédé 193
Préparation des pièces à souder 197
Le soudage sous vide partiel 197
Le soudage hors vide 198
Avenir du procédé 198

CHAPITRE XI

LE SOUDAGE ÉLECTRIQUE PAR RÉSISTANCE 199

Soudage par points 199
Les machines à souder par points 210
La pratique du soudage par points 215
Les machines à souder par résistance à décharge de condensateurs 220
Essais des soudures 221
Soudage à molettes 223
Soudage en bout par résistance 227

CHAPITRE XII

LE SOUDAGE PAR FRICTION 231

Principe 231
Machines à souder par friction 232
Applications du soudage par friction 233

CHAPITRE XIII

CONTROLE ET ESSAIS DES SOUDURES 234

Essais destructifs 234
Essais semi-destructifs 234
Essais non destructifs 235

CHAPITRE XIV

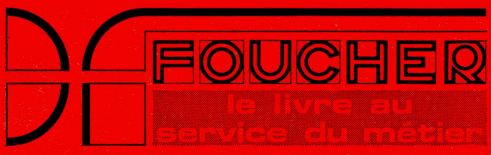
LE SOUDO-BRASAGE 241

Soudo-brasage des métaux ferreux 242

Les Éditions Foucher
128, rue de Rivoli, Paris (1er)
N° 3046-973

Imprimé en France

Imprimerie des Dernières Nouvelles de Strasbourg
Dépôt légal N° 73106/73


FOUCHER
le livre au
service du métier